Reinhard Breuer
Chefredakteur

Die Weitergabe des Feuers

Tradition bedeutet nicht die Anbetung der Asche, sondern die Weitergabe des Feuers«, verkündet ein Sprichwort. Gemeint ist das Feuer der Erkenntnis und das Licht der Aufklärung. Vor 25 Jahren wurde »SPEKTRUM der Wissenschaft« gegründet – ein nahezu historischer Zeitraum. Mehrere tausend Abonnenten der ersten Monate sind bis heute treue Mitglieder der SPEKTRUM-Leserschaft geblieben.

Beim Durchblättern der Erstausgabe vom Oktober 1978 überrascht die Aktualität der Themen: »Das Kohlendioxid-Problem« und »Das Lernvermögen und Gedächtnis der Bienen« zieren die Erstausgabe ebenso wie »Die Oberfläche des Mars« oder die »Epidemiologie der Influenza«. An Brisanz für die Wissenschaft haben sie in der Zwischenzeit nichts verloren. Damals erschien SPEKTRUM noch als reine Übernahme-Edition von »Scientific American«. Der aufklärerischen Tradition dieser ältesten und bekanntesten Wissenschaftszeitschrift der Erde fühlt sich SPEKTRUM bis heute verpflichtet (siehe auch Seite 103).

Unser Weltbild, ja unsere Welt wurde – nicht weniger als etwa von politischen Umwälzungen – durch die Wissenschaft und Technik der letzten Jahrzehnte revolutioniert: Computer, Klimaforschung, Stringtheorie, Rastertunnelmikroskopie, Medizindiagnostik oder Gentechnik. Daher starten wir in unser Jubiläumsjahr mit einer zwölfteiligen Serie zu den wichtigsten Forschungshighlights des letzten Vierteljahrhunderts. In diesen Beiträgen werden prominente Experten auf die Höhepunkte ihres Fachgebiets zurückblicken, den heutigen Stand beurteilen und die künftige Entwicklung einschätzen (Seite 22). Sie zeigen: Rasante Fortschritte in der Forschung sind für uns beinahe Alltag geworden. Erst wenn 25 Jahre in zwölf Monate gebündelt werden, erkennt man, wie stark sie die Welt verändert haben.

Die SPEKTRUM-Erstausgabe vom Oktober 1978, Art-Director Karsten Kramarczik (29) mit Redaktionsmaskottchen »Cooper«

Sie haben es vermutlich bemerkt: Unser Art-Director Karsten Kramarczik hat das Design des Heftes überarbeitet, um es noch ansprechender und übersichtlicher zu gestalten. Schritte in diese Richtung haben wir schon in der Vergangenheit unternommen. Etwas kommt diesmal neu hinzu: Ab dieser Ausgabe wird SPEKTRUM nicht mehr geheftet, sondern »klebegebunden« – ein Service vor allem für Sammler, die die Themen dann auch auf dem Heftrücken lesen können. Ich hoffe, Sie erkennen Ihr SPEKTRUM trotzdem wieder, denn Inhaltsvielfalt und Qualität bleiben unverändert. Damit Sie sich weiter von der Wissenschaft faszinieren lassen – von dem Abenteuer, die Welt zu erkennen – und uns, die Träger des Feuers, in ihr.

INHALT

FORSCHUNG AKTUELL

8 **Beeinflusst die kosmische Strahlung das Klima?**
Umstrittene Theorie sieht in variablem Sonnenwind Ursache der Erderwärmung

10 **Ein halbes Mal Würfeln ist zu wenig**
Interview zu einer umstrittenen Theorie

12 **Mit dem Nanostempel zu neuen Dimensionen der Winzigkeit**
Chipfabrikation der Zukunft

14 **Der Gemeinschaftssinn der Bakterien**
Wie Mikroben zählen, wie viele sie sind

17 **Bild des Monats**
Antarktische Eisberge

SPEKTROGRAMM

36 Ferngesteuerte Herz-OP · Tiefbeben durch Ultraschall · Altsyrische Königsgruft · Magnetfelder formen Nebel u.a.

THEMEN

22 **25 Jahre Spektrum der Wissenschaft. Teil I: Paläoanthropologie**
Evolution des Menschen. Das neue Weltbild

28 **TITELTHEMA: Sternkollisionen**
Wie in Kugelsternhaufen ein neuer Sterntyp entsteht

38 **Schlammvulkane**
Ausgepresstes Porenwasser verwandelt Tonsedimente in Gesteinsbrei, der gewaltsam nach oben dringt

48 **Großmüttersyndrom**
Die Interessen der Großmütter. Strategische Entscheidungen

56 **Quanten-Identität**
Die Ursache der Quantenrätsel liegt im Verlust der Individualität aller Teilchen

64 **Notfallmedizin**
Ärzte an der vordersten Front im Kampf um Leib und Leben

74 **Roboter**
Kraft der Gedanken. Gehirn befiehlt, Maschine gehorcht

84 **Avicenna**
Der muslimische Arzt und Philosoph beeinflusste auch die europäische Wissenschaft

Titelbild: Falls ein Zwergstern mit der Sonne kollidierte, würde unser Zentralgestirn in einer gigantischen Explosion zerrissen; Atmosphäre und Ozeane auf der Erde würden verkochen.

Bild: Spektrum der Wissenschaft, basierend auf einem Original von Mark A. Garlick

SEITE 28

TITELTHEMA: STERNKOLLISIONEN

Wenn Sterne zusammenprallen

Das Feuerwerk, das die Kollision zweier Sterne entfacht, könnte ein hübscher Anblick sein – solange man sich nicht allzu nahe befände. Entgegen bisheriger Auffassung sind solche kosmischen Verkehrsunfälle in bestimmten Regionen unseres Milchstraßensystems recht häufig.

SEITE 22

25 JAHRE SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT
TEIL I: PALÄOANTHROPOLOGIE

Die Evolution des Menschen

In den letzten Jahrzehnten entstand ein neues Bild von der Menschenevolution. Anstelle eines Stammbaums steht nun ein verzweigter Busch.

SEITE 38

SCHLAMMVULKANE

Schlote, die Schlamm statt Feuer speien

Mit ihrem sprudelnden Gemisch aus Tonbrei, Wasser und Methan sind sie weniger gefährlich als normale Feuerberge. Doch haben die bis zu 2000 Meter hohen und 40 Kilometer breiten Dome großen Einfluss auf das Klima.

SEITE 48

SOZIOBIOLOGIE

Warum gibt es Großmütter?

Weshalb beim Menschen helfende Großmütter vorkommen, ist umstritten. Den Familien brachten sie wohl nicht immer Segen – zumindest in einer früheren deutschen Bauernbevölkerung.

SEITE 56

QUANTENPHYSIK

Die Identität der Quanten

Die Rätsel der Quantenwelt erklärt eine neue Interpretation damit, dass Mikropartikel vollkommen identisch und ununterscheidbar sind.

SEITE 74

NEUROPROTHESEN

Roboter steuern von Geistes Hand

Ein Roboterarm bewegt sich nach den Kommandos eines lebenden Gehirns. Was nun mit Hilfe raffinierter Technik bei Affen gelungen ist, könnte körperlich behinderten Menschen eines Tages zu mehr Freiheit verhelfen.

SEITE 84

AVICENNA

Ein Muslim im Kirchenfenster

Der Arzt und Philosoph Avicenna kam wie kein anderer Gelehrter aus dem arabisch-islamischen Raum auch im Abendland zu hohen Ehren. Seine Werke wurden jahrhundertelang an europäischen Hochschulen als Standardlehrbücher benutzt.

TECHNOSKOP-SPEZIAL

SEITE 64

Notfallmedizin

Wenn ein Schlaganfall einen Menschen niederstreckt, ein Unfallopfer schwer verletzt auf der Straße liegt oder ein Selbstmord noch zu verhindern ist, kommt es auf jede Sekunde an. Dann greift eine Notfallkette, die heute die ganze Palette medizinischer Techniken nutzt und durch Forschung ständig verbessert wird.

FORSCHUNG UND GESELLSCHAFT

94 **Klonen von Menschen? Wissenschaftlich unhaltbar!**
Interview mit dem Mikrobiologen und Robert-Koch-Preisträger Rudolf Jaenisch

96 **Am Rande**
Sterntaler und Mond-Moneten

98 **Das mathematische Mitmach-Museum**
Eröffnung des Mathematikums in Gießen

REZENSIONEN

103 **The Age of Science** von Gerard Piel
Der Mensch wird geboren
von Volker Gerhardt
Wohin die Reise geht … vom
Verband deutscher Biologen (Hg.)
A Plague of Rats and Rubbervines
von Yvonne Baskin
Klassische Fundstellen der Paläontologie
von Werner K. Weidert (Hg.)

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

110 **Wie kommt man nach Disentis?**

WEITERE RUBRIKEN

3 **Editorial**

6 **Leserbriefe**

7 **Impressum**

21 **Im Rückblick**

54 **Wissenschaft im Alltag**
Kreiselsysteme

92 **Wissenschaft in Unternehmen**

108 **Wissenschaft im Internet**

109 **Preisrätsel**

115 **Stellenmarkt**
Lehre und Forschung

118 **Vorschau**

Ihr Wissenschafts-Portal: www.wissenschaft-online.de

Täglich Meldungen aus Wissenschaft, Forschung und Technik. Dazu Hintergrundinformationen, Software, Preisrätsel und Spektrum-Produkte. Ihr Spektrum-Magazin finden Sie wie immer unter **www.spektrum.de**

Muss Musil modern?

Nachgehakt, Oktober 2002

Die Kritik an dem Literaturkritiker Reich-Ranicki von Michael Springer trifft den wunden Punkt. Sie ist nur durch folgenden Hinweis zu ergänzen: In seinem Verriss »Musils Fiasko« (im »Spiegel« 34/2002) geht Reich-Ranicki wie in allen anderen Besprechungen viel zu wenig von der Sprache des Autors aus. Wieder einmal bleibt er an der inhaltlichen Oberfläche haften und versäumt es, den Roman konsequent über das Medium Sprache zu erschließen.

Über eine inhaltliche Analyse ist lediglich der Unterhaltungswert von Literatur auszumachen. Die stilistische Bewertung eines Textes als sprachliches Kunstwerk kann so nicht gelingen. Entsprechend unbegründet und ungerecht ist die Abstrafung dieses hervorragenden Autors durch Reich-Ranicki.

Prof. Eberhard Hildenbrandt, Marburg

Inselbegabungen

September 2002

Erstaunliche Inselbegabungen gibt es. Doch Eltern und Therapeuten neigen zu kompensatorischen Übertreibungen. Der Beitrag behauptet, dass bei etwa jedem zehnten autistischen Menschen Inselbegabungen auftreten. Dabei unterscheidet er nicht einmal die von Asperger fast gleichzeitig mit Kanner beschriebene besondere Gruppe mit meist höherem IQ.

Meine Erfahrung mit Autisten kennt nur Begabungsinselchen bei sehr geringer Intelligenz. Darin Ansätze für die Förderung zu suchen wäre wichtiger als Wunderberichte. Für mich unglaubhaft ist Lemkes Spiel von Tschaikowskys Klavierkonzert nach einmaligem Hören ohne vorherigen Klavierunterricht. Ein phänomenales Gedächtnis genügt nicht. Enorme psychomotorische Fertigkeiten, basierend auf einer durch Jahrhunderte entwickelten Klaviertechnik, gehören dazu.

Eine Banalität im Vergleich zu Lemke: Der 14-jährige Mozart, seit frühester Kindheit intensiv geschult, schrieb nach einmaligem Hören das Miserere von Allegri auf – eine noch heute einmalige und gelegentlich bezweifelte Leistung.

Prof. Hellmut Thomke, Bern

Gibt es Dunkle Materie?

Oktober 2002

Nachdem in den Köpfen der Menschheit jahrtausendelang die Erde das Zentrum des Weltalls war, brachte es die Sonne noch auf Jahrhunderte, um als Mittelpunkt zu dienen. Nun bleibt das durch den Urknall entstandene Weltall als einmaliger und zentraler Aufenthaltsbereich der Menschheit.

Es erscheint doch völlig absurd, hier ein Ende zu setzen. Wieso ist unser Urknall nicht ein ganz normales Ereignis in einem größeren Bereich, in dem unbekannt viele Weltalls ständig entstehen und vergehen, wie bei uns Sonnen und Galaxien. Dann kann unser Urknall, entsprechend einer Supernova in unserem Weltall, umbenannt werden in eine sicher wieder ganz durchschnittliche »Hypernova« in dem größeren »Hyperall«.

Diese anderen Weltalls nehmen Einfluss über ihre Gravitationskräfte und -wellen auf unser Weltall. Damit könnte sich die Suche nach einer Erklärung für die Dichtefluktuationen in unserem Weltall oder eine Diskussion über Dunkle Materie, Dunkle Energie oder eine Gravitationskonstante, die nicht konstant ist, auf eine völlig andere Ebene verschieben.

Dipl.-Ing. Heiko Jansen, Tutzing

Geisteswissenschaften auf der Verliererstraße?

Editorial, November 2002

Wer den Graben nicht sieht

Dem Diktum von Herrn Markl, der Gegensatz sei Schnee von gestern und es gebe nur einen Gegensatz zwischen rational aufgeklärten oder nicht von Aufklärung geprägten Bildungskulturen, kann ich keineswegs beipflichten. Dabei stütze ich mich nicht nur auf die eigene persönliche Erfahrung, sondern auch auf eine Untersuchung des Deutschen Instituts für Fernstudienforschung, das sogar zu quantifizierten Ergebnissen gekommen ist. Wer den Graben nicht sieht oder nicht sehen will, ist zu sehr einer der beiden Seiten verhaftet.

Gerne räume ich ein, dass dieser Befund intellektuell nicht befriedigend ist, sondern ein Ärgernis darstellt. Es ist aber auch keine Lösung des Problems, mit dem großen Quast voll Tünche darüber hinwegzufahren.

Dr. Dr. Rolf C. A. Rottländer, Rottenburg

Unfähigkeit der »harten« Wissenschaften

Sie beklagen hier die »Schwierigkeiten, bei den Geisteswissenschaften hinreichend interessante Themen zu entde-

SLIM FILMS

Besteht das All größtenteils aus einer unsichtbaren Substanz von unbekannter Art?

cken«. Die Gefahr, diese Wissenschaften befänden sich auf der »Verliererstraße« bis hin zu einer »Geistfeindschaft«, sehe ich nicht – wohl aber eine zunehmende Unfähigkeit der angeblich »harten« Wissenschaften, ihre Ergebnisse zu interpretieren, sobald sie den Bereich ihres Spezialwissens verlassen.

Bernhard Becker, Duisburg

Perfekte Abbildung der Welt

Wozu brauchen wir die Geisteswissenschaftler noch? Sie sind wohl nicht nur dazu da, ein Weltkulturerbe zu tradieren, sondern sollten auch das Allgemeine in ihrem jeweiligen Fachbereich entdecken. Die Welt besitzt offensichtlich allgemeine Strukturen, die wir durch die Aufstellung physikalischer Gesetze, aber auch durch kommunikationstheoretische, psychologische, soziologische oder ökonomische Modelle in Form eines Algorithmus möglichst perfekt abzubilden versuchen. Erst bei dieser Strukturerforschung wird es – auch für Spektrum-Leser – richtig interessant. Darum halte ich es nicht für gerechtfertigt, in Natur- und Geistes-/Humanwissenschaften zwei getrennte Bereiche zu sehen.

Sönke Finnern, Kiel

DANIELLE LAVALLÉE

Fischer in der Wüste

November 2002

Dieser Beitrag gefällt mir gut. Jedoch ist das, was auf dem Foto wie Muschelschalen aussieht und in der Bildlegende (im November-Heft auf Seite 59) auch so beschriftet ist, Schalen der Schnecke *Concholepas*. Bei *Concholepas* handelt es sich um die wichtigste kommerziell genutzte Schnecke Chiles. Die ovale Schale erinnert an eine Muschelschale. Die bis 10 cm lange Schnecke lebt und frisst Muscheln (Storch/Welsch: Systematische Zoologie).

Prof. Volker Storch, Heidelberg

Fernab der Küste: Was hier wie Muscheln aussieht, ist eine Ansammlung von Schalen der Schnecke *Concholepas*.

Kultur bei Schimpansen?

Forschung und Gesellschaft
November 2002

Der Autor stellt die Frage, was den Menschen vom Tier unterscheide. In der traditionellen Diskussion über diese Frage scheint mir ein Aspekt übersehen zu werden: Die Frage lässt sich schwer beantworten, da sie eine stillschweigende Annahme macht, die nicht unbedingt zutreffen muss. Es wird implizit unterstellt, der Mensch stehe über dem Tier. Lässt man diese Annahme fallen, so ergibt sich die Antwort fast wie von selbst. Was den Menschen vom Tier unterscheidet, ist die Selbstüberschätzung.

Steffen Krüger, Köln

Briefe an die Redaktion …

… richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com
Fax: (06221) 91 26 -729

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Katharina Werle, Christina Peiberg
Bildredaktion: Alice Krüßmann
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Natalie Schäfer, Andreas Merkert (stv. Hersteller)
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. (06221) 91 26-711, Fax (06221) 91 26-729
Büro Bonn: G. Hartmut Altenmüller, Tel. (02244) 43 03, Fax (02244) 63 83, E-Mail: ghalt@aol.com
Korrespondenten: Dieter Beste, Marion Kälke, Tel. (0211) 908 33 57, Fax (0211) 908 33 58, E-Mail: Dieter.Beste@t-online.de
Produktentwicklung: Dr. Carsten Könneker, Tel. (06221) 91 26-770
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. (06221) 91 26-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. (06221) 91 26-741, E-Mail: marketing@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. (06221) 91 26-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Ulf Borgeest, Dr. Rainer Kayser, Bernhard Gerl, Dr. Ingrid Horn, PD Dr. Udo Gansloßer, Dr. Michael Springer.
Verlag: Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg;
Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. (06221) 91 26-600, Fax (06221) 91 26-751
Geschäftsleitung: Dean Sanderson, Markus Bossle
Leser-Service: Tel. (06221) 91 26-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft, Boschstraße 12, 69469 Weinheim, Tel. (06201) 60 61 50, Fax (06201) 60 61 94
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konten: Deutsche Bank, Weinheim, 58 36 43 202 (BLZ 670 700 10); Postbank Karlsruhe 13 34 72 759 (BLZ 660 100 75)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Sibylle Roth, Tel. (0211) 887-23 79, Fax (0211) 887-23 99 verantwortlich für Anzeigen: Stefan Söht, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (0211) 887-23 86, Fax (0211) 887-28 46
Anzeigenvertretung: Berlin-West: Rainer W. Stengel, Lebuser Str. 13, 10243 Berlin, Tel. (030) 7 74 45 16, Fax (0 30) 7 74 66 75; Berlin-Ost: Dirk Schaeffer, Friedrichstraße 150–152, 10117 Berlin, Tel. (030) 6 16 86-150, Fax (030) 6 15 90 05, Telex 114810; Hamburg: Michael Scheible, Stefan Irmler, Burchardstraße 17, 20095 Hamburg, Tel. (040) 30 18 31 94, Fax (040) 33 90 90; Düsseldorf: Cornelia Koch, Klaus-P. Barth, Werner Beyer, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (0211) 301 35-20 50, Fax (0211) 1 33 97 4; Frankfurt: Anette Kullmann, Annelore Hehemann, Holger Schlitter, Große Eschenheimer Straße 16–18, 60313 Frankfurt am Main, Tel. (069) 92 01 92 82, Fax (069) 92 01 92 88; Stuttgart: Norbert Niederhof, Königstraße 20, 70173 Stuttgart, Tel. (07 11) 22 47 5 40, Fax (07 11) 22 47 5 49; München: Reinold Kassel, Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15, 80331 München, Tel. (089) 54 59 07-12, Fax (089) 54 59 07-16
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. (0211) 887-23 87, Fax (0211) 374 9 55
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 24 ab 01.01.2003.

Gesamtherstellung:
Konradin Druck GmbH, Leinfelden-Echterdingen

© Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, D-69038 Heidelberg.

Kein Teil dieser Zeitschrift darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder in eine von Datenverarbeitungsmaschinen verwendbare Form oder Sprache übertragen oder übersetzt werden. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: Rolf Grisebach, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg

KLIMAFORSCHUNG

Beeinflusst die kosmische Strahlung das Klima?

Neuen Modellrechnungen zu Folge fördert die kosmische Strahlung die Wolkenbildung und damit kühlere Temperaturen auf der Erde. Ihre zunehmende Abschirmung durch den sich verstärkenden Sonnenwind könnte einen Teil der globalen Erwärmung erklären.

Von Thilo Körkel

Astronomiebegeisterte Weizenspekulanten hätten mit den Erkenntnissen von William Herschel (1738–1822) viel Geld verdienen können. Im Jahre 1801 stellte der aus Hannover stammende Astronom eine gewagte Hypothese auf: Vermehrte Sonnenflecken gehen mit intensiverer Sonnenstrahlung und damit einer milderen Witterung einher.

Allerdings fehlten Herschel die Temperaturdaten, um seine Idee zu überprüfen. Daher nahm er kurzerhand den Weizenpreis als Indikator: Kälte, so seine Überlegung, führt zu schlechteren Ernten, und das treibt den Preis in die Höhe. Tatsächlich zeigte die langjährige statistische Analyse, dass sich das Getreide bei sinkender Anzahl der Sonnenflecken verteuerte.

Das Gelächter, mit dem Herschels Gedanken seinerzeit bedacht wurden, ist längst verstummt. Die Verbindung zwischen Sonnenflecken, solarer Aktivität und globalem Klima hat sich als real und folgenschwer erwiesen. So ließ eine aktivere Sonne zwischen dem 9. und dem 14. Jahrhundert die Temperatur in Europa um bis zu ein Grad ansteigen. Auch die »Kleine Eiszeit« in Nordeuropa zwischen 1550 und 1850 beruht zu einem großen Teil auf Schwankungen der solaren Aktivität, verstärkt durch Vulkanismus. Damals verschwanden fast alle Sonnenflecken; die Temperatur sank um ein Grad. Missernten führten zu Hungersnöten, und extrem kalte Winter ließen die Flüsse zufrieren.

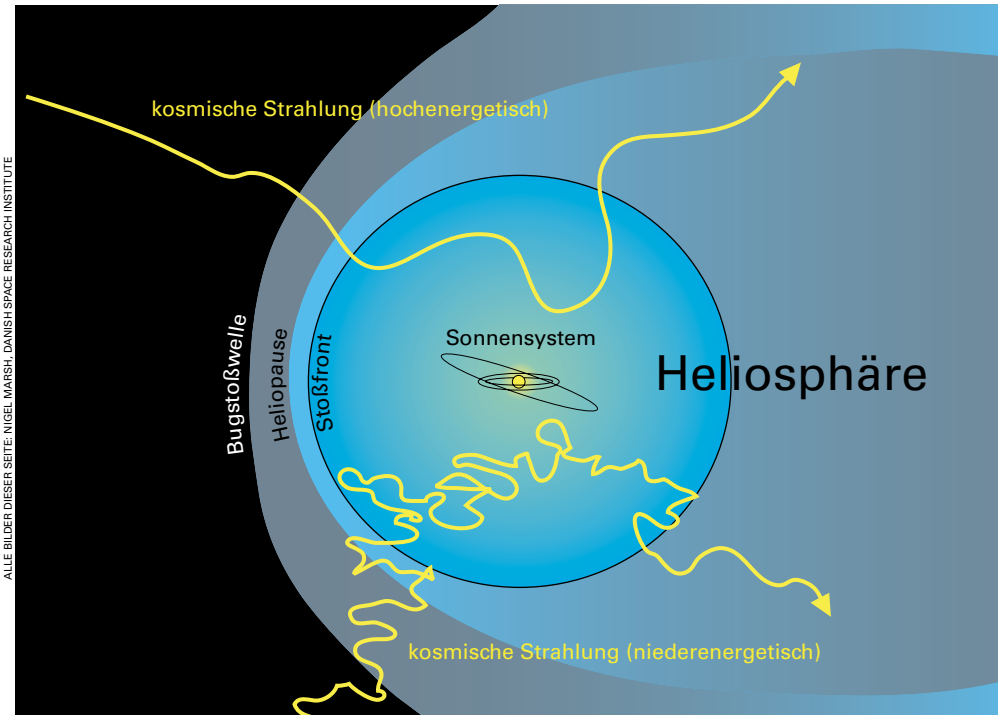
Die Rolle des Sonnenwinds

Auch zur heute beobachteten globalen Erwärmung leistet die steigende Sonnenaktivität einen Beitrag. Das Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC), eine Art Klimabeirat der Vereinten Nationen, schätzt ihn auf rund zwanzig Prozent. Den Löwenanteil schreibt es den Treibhausgasen zu, die der Mensch der Atmosphäre zuführt. Als Maß für die Klimawirksamkeit dient dabei der so genannte Strahlungsantrieb. Er gibt an, wie stark ein bestimmter Klimafaktor das Gleichgewicht zwischen der auf die Erde einfallenden und der von ihr ins All zurückgeworfenen Strahlung verschiebt. Je größer der Strahlungsantrieb dieses Faktors, desto mehr trägt er zur Erwärmung bei.

Eine neuere Theorie schreibt der Sonne allerdings einen größeren Einfluss zu als die vom IPCC geschätzten 0,3 Watt pro Quadratmeter. Dabei berücksichtigt sie einen indirekten Effekt über den Sonnenwind, der sich bei zunehmender solarer Aktivität gleichfalls intensiviert. Die Argumentation ist recht vertrackt und geht um mehrere Ecken. Der Sonnenwind selbst wirkt sich nämlich nicht auf das Klima aus, da ihn das Erdmagnetfeld in weitem Bogen um unseren Planeten herumlenkt. Allerdings beeinflusst er seinerseits einen anderen Teilchenstrom: die so genannte kosmische Strahlung aus dem Weltall.

Sie besteht aus Teilchen mit Energien bis zu 10^{20} Elektronenvolt – 100 Millionen Mal so viel, wie Physiker mit den besten Teilchenbeschleunigern erreichen können. Hauptsächlich handelt es sich um Protonen, hinzu kommen Kerne von Helium sowie – zu einem geringen Prozentsatz – von schwereren Elementen. Der Ursprung der kosmischen Strahlungsteilchen ist noch unklar, möglicherweise stammen sie von fernen Sternexplosionen (Supernovae). Durch ihre sehr hohe Energie dringen sie bis in die untere Atmosphäre ein.

In jüngster Zeit aber wurden immer mehr von ihnen schon im All ausgebremst: Der Sonnenwind verdoppelte in den vergangenen hundert Jahren seine Stärke und reduzierte so die Intensität der auf die Erde auftreffenden kosmischen Strahlung um rund fünfzehn Prozent. Im Jahr 1997 fanden Eigil Friis-Christensen und Henrik



ALLE BILDER DIESER SEITE: NIGEL MARSH, DANISH SPACE RESEARCH INSTITUTE

Die Heliosphäre schützt das Sonnensystem vor kosmischer Strahlung. Gebildet wird sie durch den Sonnenwind. Er führt ein Magnetfeld mit sich, das die kosmische Strahlung ablenkt – je nach Sonnenaktivität stärker oder schwächer. An der Stoßfront in einer Entfernung von etwa 200-mal dem Abstand Erde–Sonne werden die schnellen Sonnenwindteilchen auf Unterschallgeschwindigkeit abgebremst. Die Heliosphäre endet an der Heliopause: Außerhalb von ihr dominiert interstellares Gas. Noch weiter draußen schiebt die durchs All pflügende Heliosphäre möglicherweise eine „Bugstoßwelle" vor sich her.

Svensmark vom Dänischen Institut für Weltraumforschung in Kopenhagen Hinweise auf einen möglichen Zusammenhang zwischen diesem Effekt und der globalen Erwärmung. Sie stellten fest, dass bei hoher Intensität kosmischer Strahlung die Wolkenbedeckung über den Meeren zunimmt und umgekehrt.

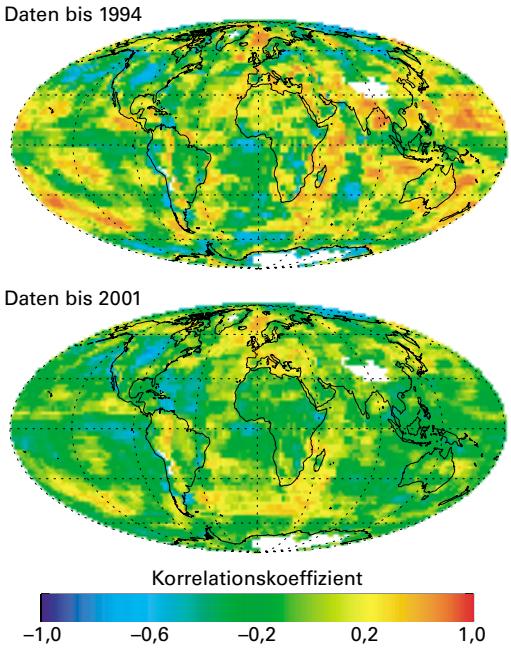
Drei Jahre später konnten sie dieselbe Korrelation auf Basis umfassenderer Daten auch für die Landflächen nachweisen. Demnach würde die Abschwächung der kosmischen Strahlung durch einen heftigeren Sonnenwind über geringere Wolkenbildung für mehr Sonnenschein und damit höhere Temperaturen sorgen. Aber wie können die Teilchen aus dem All die Wolkenbildung fördern?

Eine mögliche Antwort liefern nun Untersuchungen von Fangqun Yu von der State University of New York in Albany. Er fand anhand von Modellrechnungen heraus, dass eine intensivere kosmische Strahlung in der unteren Troposphäre mehr Kondensationskeime für Wassertröpfchen erzeugt, von denen die Wolkenbildung ausgeht. Die Troposphäre ist die erdnahe Atmosphärenschicht, in der das Wetter stattfindet; darüber liegt ab etwa acht Kilometer Höhe die Stratosphäre. Wenn also die kosmische Strahlung abnimmt, ist die Wolkendecke dünner und hält weniger Sonnenlicht ab. Dadurch steigt die Temperatur an der Erdoberfläche. Gleichzeitig kühlt sich die untere Troposphäre ab, da es dort weniger Wolken gibt, die sich durch Lichtabsorption erwärmen könnten.

Das würde vielleicht auch ein besonders widerspenstiges Problem der Klimaforscher lösen: Während sich die Oberfläche der Erde im Verlauf der vergangenen zwei Jahrzehnte um rund 0,15 Grad Celsius pro Jahrzehnt erwärmt hat, ergeben Satelliten- und Ballonmessungen bis in acht Kilometer Höhe überraschenderweise nur einen Temperaturanstieg um ein Drittel dieses Werts; sogar sinkende Temperaturen liegen im Bereich der Messunsicherheiten. Im Widerspruch dazu prognostizieren die aktuellen Klimamodelle, dass sich die Troposphäre aufgrund des Treibhauseffektes sogar schneller als die Erdoberfläche aufwärmen sollte. Angesichts dieser Diskrepanz haben manche Wissenschaftler sogar bezweifelt, dass tatsächlich eine globale Erwärmung stattfindet. Mit Yus Modellrechnungen ließe sie sich hingegen zwanglos erklären.

Insgesamt könnte die verringerte kosmische Strahlung, wie der amerikanische Forscher spekuliert, in den letzten beiden Jahrzehnten rund ein Drittel des tatsächlich gemessenen Temperaturanstiegs der Erdoberfläche verursacht haben. Auch Wissenschaftler des Europäischen Teilchenforschungszentrums Cern sehen dies so. Im Cloud-Projekt, das voraussichtlich in diesem Sommer starten wird, wollen sie mit Hilfe einer künstlichen Quelle für kosmische Strahlung deren Einfluss auf die Mikrophysik der Atmosphäre überprüfen.

Besteht zwischen der niedrigen Wolkendecke über dem Globus und der Intensität der kosmischen Strahlung ein Zusammenhang? Der Infrarot-Datensatz des ISCCP (*International Satellite Cloud Climatology Project*) bis 1994 lässt das vermuten (oben). Nimmt man dagegen die Daten bis 2001, ist die Korrelation so gut wie verschwunden. Allerdings legt der Vergleich mit den weniger vollständigen Messwerten des *Special Sensor Microwave Imager* im Mikrowellenbereich nahe, dass die ISCCP-Daten ab 1994 einen systematischen Fehler aufweisen. Werden sie entsprechend korrigiert, bleibt die Korrelation bis 2001 erhalten.



Dünnere Wolkendecke

Projektleiter Jasper Kirkby vermutet, dass die globale Wolkenbedeckung in niedrigen Höhen im letzten Jahrhundert um 1,3 Prozent abgenommen hat. Dies entspräche einem Strahlungsantrieb von 0,8 Watt pro Quadratmeter. Den Strahlungsantrieb durch den Menschen, hervorgerufen durch die Emission von Treibhausgasen und Aerosolen sowie zu kleinen Teilen durch eine veränderte Landnutzung, schätzt das IPCC im selben Zeitraum auf 1,3 Watt pro Quadratmeter.

Der kosmische Effekt rückt somit in eine ähnliche Größenordnung wie der menschliche Einfluss auf das Klima. Doch wie gesichert ist eine solche Erkenntnis? Bisherige Klimamodelle bilden die variablen Eigenschaften der Sonne ebenso wie die komplexen Vorgänge in der Atmosphäre nur unzureichend ab. Auch die neuen Ansätze weisen gravierende Schwachpunkte auf und sind von einer vollständigen Beschreibung aller beteiligten Prozesse weit entfernt. Angesichts der großen Unsicherheiten gehen die Positionen der Wissenschaftler daher teilweise weit auseinander (siehe Interview auf Seite 10).

Unterdessen weitet sich die Suche nach Klimaeinflüssen auf die gesamte Milchstraße aus. Einer neuen Studie zufolge trifft seit einigen Jahrmillionen nur wenig kosmische Strahlung auf die Erde, weil sich unser Sonnensystem in einer relativ dünn mit Sternen bestückten Region der Milchstraße befindet. Wandert es dagegen in das viel dichtere Zentrum eines Spiralarms, dürfte sich angesichts der dort viel häufiger anzutreffenden Supernovae das Teilchen-Bombardement aus dem All verdoppeln. In der Erdatmosphäre sollten der Theorie zufolge dann viel mehr Wolken entstehen, sodass die Temperaturen am Boden stark sinken.

Dass dies in unserer Vergangenheit bereits mehrfach der Fall gewesen sein könnte, zeigt die Untersuchung von 42 Eisenmeteoriten durch Nir Shaviv von der Universität Toronto und der Hebräischen Universität in Jerusalem. Mikroskopische Spuren von Einschlägen hochenergetischer Teilchen auf der Oberfläche dieser Vaganten aus unserem Sonnensystem deuten auf einen Intensitätszyklus der kosmischen Strahlung von rund 143 Millionen Jahren hin. Diese Periode wiederum passt gut mit den geologischen Erkenntnissen über die Periodizität der Eiszeiten auf der Erde zusammen. ◁

Thilo Körkel ist Diplomphysiker und freier Journalist in Frankfurt am Main.

INTERVIEW

Ein halbes Mal Würfeln ist zu wenig

Nach Ansicht des Potsdamer Klimaforschers Martin Claussen steht die Hypothese, dass kosmische Strahlung das globale Klima beeinflusst, auf wackligen Beinen. Mensch, Sonne und „interne Variabilität" gelten derzeit als wichtigste Klimafaktoren.

Spektrum der Wissenschaft: Herr Professor Claussen, die Erde wird wärmer. Hat die kosmische Strahlung irgendetwas damit zu tun?

Martin Claussen: Manche Kollegen vermuten einen Zusammenhang zwischen der Intensität der kosmischen Strahlung und der Wolkendecke über der Erde. Ein Statistiker hat zu einer entsprechenden Studie der dänischen Klimaforscher Friis-Christensen und Svensmark allerdings gesagt: Das ist, als wolle man aus einem halben Mal Würfeln bereits die Statistik des gesamten Spiels ableiten. Die Dänen haben sich in ihrer ersten Untersuchung nur auf einen halben elfjährigen Sonnenzyklus bezogen.

Spektrum: Betrachten Sie die Hypothese damit als erledigt?

Claussen: Mittlerweile wurden die Untersuchungen verbessert, und auch andere Forscher haben Korrelationen entdeckt. Doch die These steht weiterhin auf wackligen Füßen.

MARTIN CLAUSSEN

Martin Claussen ist Professor für Klimaphysik an der Universität Potsdam und Leiter der Abteilung Klimasysteme am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung.

So wäre zum Beispiel zu erwarten, dass die Korrelation in hohen Breiten am stärksten ist, weil dort die kosmische Partikelstrahlung am größten ist. Ebenso sollten die Auswirkungen bei den hohen Wolken stärker sein als bei den niedrigen. Die Daten belegen jedoch praktisch das Gegenteil. Eine Veröffentlichung, die demnächst im Journal of Geophysical Research erscheinen wird, zeigt außerdem, dass die Korrelation von Friis-Christensen und Svensmark völlig zusammenbricht, wenn man sie weiter in die Vergangenheit zurückverfolgt. Zwar wurden auch Theorien zur Wirkung kosmischer Partikelstrahlung aufgestellt; viele Wolkenphysiker bezweifeln jedoch ihre Übertragbarkeit auf unsere Atmosphäre.

Spektrum: Der anerkannte Stand der Klimaforschung, wie ihn beispielsweise die Berichte des Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) widerspiegeln, weist aber ebenfalls noch Erklärungslücken auf. So stehen die Prognosen aktueller Klimamodelle über die Erwärmung der Troposphäre im Widerspruch zu den Messungen.

Claussen: Über die Erwärmung der bodennahen Troposphäre und deren physikalische Erklärung gibt es wenig Zweifel. Aber die bodennahe Atmosphärenschicht erwärmt sich stärker als die mittlere Troposphäre; das können Klimamodelle derzeit nicht abbilden. Neuere Berechnungen des IPCC kommen den Beobachtungen jedoch viel näher – nämlich dann, wenn sie den Ozonabbau der letzten Jahrzehnte in der Stratosphäre berücksichtigen. Aufgrund dieses Abbaus wird weniger ultraviolettes Licht durch Ozon absorbiert, und die Erwärmung verringert sich, was auch die darunter gelegene Troposphäre beeinflusst. Welche Prozesse dabei im Einzelnen eine Rolle spielen, muss allerdings noch geklärt werden. Im Übrigen halte ich das Problem der unterschiedlich raschen Erwärmung der verschiedenen Schichten der Troposphäre für nicht so gravierend, dass wir unsere Kenntnisse über den Treibhauseffekt und die Erderwärmung grundsätzlich revidieren müssten.

Spektrum: Wie erklären die aktuellen Klimamodelle die Erwärmung der Erde?

Claussen: Wir unterscheiden zwischen angetriebener und interner Klimavariabilität, also zwischen einer Klimaänderung, die dem Klimasystem von außen aufgeprägt wird, und einer, die von sich aus entsteht. Zum Antrieb gehören die Veränderung der Erdbahn um die Sonne, die Variabilität der Sonnenstrahlung selbst und sporadische Einschläge von Meteoriten. Die Hitze des Erdkerns einschließlich der Zerfallswärme radioaktiver Elemente im Erdmantel gilt ebenfalls als Antrieb, sozusagen von innen. Außer dem Vulkanismus bewirkt sie unter anderem die Verschiebung der Kontinente. Dies wiederum beeinflusst die Land-Meer-Verteilung auf dem Globus und damit sehr stark das Klima.

Spektrum: Und der Beitrag des Menschen?

Claussen: Die menschliche Aktivität gewinnt zunehmend an Bedeutung als nicht natürlicher Antrieb für Klimaänderungen. Ihr Einfluss beruht auf zwei Faktoren: auf der Emission von Treibhausgasen und Aerosolen sowie auf der Landnutzung. 45 Prozent der Landoberfläche hat der Mensch direkt umgestaltet. Abholzung führt beispielsweise zu einer helleren und dadurch etwas kühleren Erde. Eine Schwäche des letzten IPCC-Berichts von 2001 besteht darin, die Effekte der Landnutzung zu wenig berücksichtigt zu haben. In Kürze werden Wissenschaftler vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung zusammen mit vielen internationalen Kollegen ein neues Buch vorlegen, das den Forschungsstand zu diesem Thema umfassend diskutiert.

Spektrum: Wie wichtig ist die interne Variabilität?

Claussen: Wir nehmen an, dass die Sonne 25 bis vielleicht sogar 40 Prozent der globalen Erwärmung im 20. Jahrhundert verursacht hat. Der Einfluss des Menschen dominiert jedoch, er beträgt mindestens 50 Prozent. Die restlichen 20 bis 30 Prozent sind auf die erwähnte interne Variabilität zurückzuführen. Atmosphäre, Ozeane, Eiskappen und Vegetation: All diese Komponenten des Klimasystems tauschen miteinander Energie, Impuls und Masse aus. In einem komplexen Wechselspiel können sich daraus auch ohne äußeren Antrieb Klimaveränderungen ergeben, sozusagen ganz von alleine.

Das Interview führte **Thilo Körkel**.

COMPUTERCHIPS

Mit dem Nanostempel zu neuen Dimensionen der Winzigkeit

Hochintegrierte Chips der Zukunft könnten im wahrsten Sinne des Wortes gestempelt werden – und damit gewährleisten, dass die Computerindustrie noch für viele Jahre so rasant weiter wächst wie bisher.

Von Stefan Maier

Man kann den Managern von Intel ihre hohen Gehaltsschecks nicht verdenken, haben sie doch eine schier unlösbare Aufgabe vor sich: Innerhalb von drei Jahren müssen sie die Größe der Halbleitertransistoren auf ihren Computerchips halbieren, wollen sie nicht gegen ein von Intel-Gründervater Gordon Moore aufgestelltes Gesetz verstoßen. Der hatte im Jahre 1965 vorhergesagt, dass sich die Zahl der Transistoren eines Siliziumchips alle 18 Monate verdoppeln würde. Dies hat sich die letzten drei Jahrzehnte hindurch bewahrheitet und so allen Unkenrufen zum Trotz das rasante Wachstum der Computerindustrie gesichert.

Dennoch rasen die Chiphersteller mit großer Geschwindigkeit auf eine fast unüberwindbare Wand zu: das so genannte Beugungslimit der Optik. Danach kann ein Lichtfleck nicht viel schmaler sein als die halbe Wellenlänge der verwendeten Strahlung. Da die extrem feinen Strukturen eines Siliziumchips mit einem fotografischen Verfahren erzeugt werden, hängt die minimale Größe der Transistoren also von der Wellenlänge des verwendeten Lichts ab – je winziger das Schaltelement werden soll, desto kurzwelliger muss die benutzte Strahlung sein.

Chips nach Art von Wachssiegeln

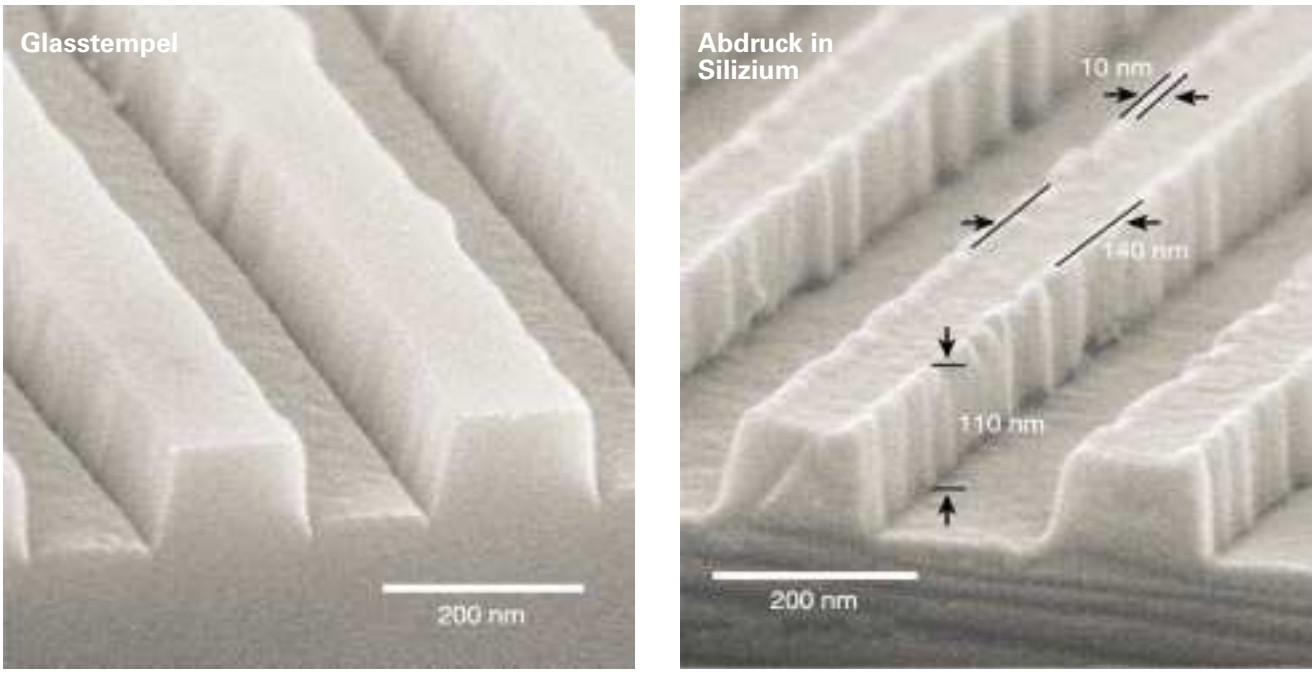
Mittels ultraviolettem Licht kann man heute immerhin schon Strukturen mit Abmessungen von nur einem Zehntausendstel eines Millimeters erzeugen. Um Moores Gesetz aufrecht zu erhalten, müsste die Chipproduktion in den nächsten Jahren aber auf noch kurzwelligere Strahlung umgestellt werden, was eine komplette Neuausstattung der Fabrikationslabors mit kostspieligen neuen Maschinen mit sich bringen würde – und auf längere Sicht dennoch zum Scheitern verurteilt wäre, weil die auftretenden Probleme nicht mehr beherrschbar sind.

Eine Gruppe um Stephen Chou von der Universität Princeton (New Jersey) wirft der Computerindustrie nun einen Rettungsring zu (*Nature, Bd. 417, S. 835*): ein neues Herstellungsverfahren für Computerchips, das sowohl schnell und billig ist als auch Strukturen mit einer Größe von nur zehn Nanometern (dem hunderttausendsten Teil eines Millimeters) erzeugen kann. Umweltfreundlich ist es obendrein.

Und selbst Laien können es verstehen: Man schmilzt die obersten Schichten einer Siliziumplatte mit einem Laserstrahl auf und drückt einen Glasstempel mit einem Negativbild des zu erzeugenden Reliefs in den erweichten Halbleiter. Dieser erstarrt innerhalb von Sekundenbruchteilen, und der Stempel kann entfernt werden, während die Grundstrukturen eines Computerchips auf der Siliziumoberfläche zurückbleiben. Der ganze Prozess ähnelt somit der Herstellung von Wachssiegeln vergangener Zeiten.

Das als Ladi (*laser assisted direct imprint*, laserunterstützter direkter Druckprozess) bezeichnete Verfahren ist in der Tat bestechend einfach. Den größten Aufwand erfordert die Herstellung des Stem-

Der Abdruck (rechts) des Glasstempels (links) auf einer Siliziumoberfläche reproduziert selbst noch zehn Nanometer feine Details am gekerbten Rand der Rillen.



STEPHEN CHOU ET AL. / NATURE, BD. 417, S. 835

pelreliefs. Zur Demonstration des Ladi-Prinzips stellten Chou und seine Kollegen daher einen relativ schlicht aufgebauten Stempel aus für Laserlicht durchlässigem Quarz her. Die Stempelfläche war einige Quadratmillimeter groß und wurde durch einen chemischen Ätzvorgang mit feinen, nur 140 Nanometer breiten und 110 Nanometer tiefen Linien sowie ungefähr zehn Nanometer langen Kerben an deren Rand versehen. Hinzu kamen um ein Zehnfaches größere Rechtecke.

Der Druckvorgang selbst gestaltete sich vergleichsweise einfach. Nachdem der Stempel fest auf die Oberfläche einer Siliziumscheibe gepresst worden war, ließ ein extrem kurzer hindurchgeschickter Laserblitz die obersten 300 Nanometer der Scheibe schmelzen. Das Relief drückte sich in die verflüssigte Schicht, die nur 220 Nanosekunden später entlang der Konturen schon wieder erstarrt war, sodass der Stempel entfernt und für einen neuen Druckvorgang eingesetzt werden konnte.

Mit Elektronen- und Rasterkraftmikroskopen nahmen die Forscher den Abdruck schließlich unter die Lupe. Und siehe da, er war fast perfekt: Selbst die nur zehn Nanometer große Feinstruktur am Rand der Relieflinien fand sich in der Siliziumoberfläche wieder (Bilder links unten). Obwohl dies allein schon einen grandiosen Erfolg darstellte, konnten die Forscher weitere günstige Eigenschaften ihrer Stempeltechnik im Hinblick auf eine zukünftige industrielle Anwendung demonstrieren.

So wurde die gesamte Stempelfläche gleichmäßig auf das Silizium übertragen; das berechtigt zu der Hoffnung, wie bisher auf Scheiben mit Durchmessern von einigen Zentimetern (so genannten Wafern) gleichzeitig viele Mikroprozessoren herstellen zu können. Zudem wurden auch die relativ großen Rechteckmuster detailgetreu abgebildet. Dies ist insofern bemerkenswert, als viele Fabrikationsmethoden der Halbleiterindustrie entweder nur sehr kleine oder sehr große Strukturen erzeugen können, nicht aber beide gleichzeitig.

Kein Ätzen mit Chemikalien

Neben Ladi sieht die herkömmliche Fotolithografie tatsächlich wie ein Dinosaurier aus. Zunächst muss man die Siliziumoberfläche mit einer lichtempfindlichen Fotoschicht versehen. Diese wird dann durch eine Maske mit ultraviolettem Licht beleuchtet und anschließend entwickelt, sodass ein dreidimensionales Relief der ▷

Fotoschicht auf der Siliziumoberfläche zurückbleibt. Durch einen Ätzvorgang mit für die Umwelt schädlichen Chemikalien kann das Muster dann in das Silizium übertragen und anschließend die Fotoschicht entfernt werden.

Doch damit ist es nicht getan: Die Fertigung eines Computerchips erfordert an die dreißig derartige Belichtungen und Ätzschritte. Die einzelnen Belichtungsmasken müssen dabei extrem genau übereinander angeordnet werden, weshalb moderne Fotolithografiemaschinen mehr als zehn Millionen Dollar kosten. Mit ihnen lassen sich bei sechzig Belichtungen innerhalb einer Minute etwa zehn Milliarden Strukturelemente auf eine wenige Quadratzentimeter messende Fotoschicht übertragen. Die kleinsten auf diese Weise mit ultraviolettem Licht erzeugten Transistoren haben eine Größe von 130 und eine Positionsgenauigkeit von 65 Nanometern – knapp unterhalb des Beugungslimits.

Dies erfordert jedoch eine Menge komplizierter und damit teurer Tricks. Ladi ist dagegen nicht nur schnell, genau und billig, sondern kommt auch ohne den umweltschädlichen Ätzvorgang aus. Es arbeitet damit praktisch chemikalienfrei.

Bevor die Intel-Manager allerdings aufatmen können, muss Ladi noch einige Hürden überwinden. Interessanterweise ist die Herstellung der komplexen Stempelreliefs hochintegrierter Computerchips mit Transistorenabmessungen unterhalb von hundert Nanometern das kleinste Problem: Diese Strukturen können mit einem Elektronenstrahl relativ einfach in den Quarzblock geschrieben werden. Das als Elektronenstrahl-Lithografie bezeichnete Verfahren ist zwar sehr zeitaufwendig und erfordert zudem mindestens einen Ätzschritt, weshalb es sich nicht für die Massenproduktion von Siliziumchips eignet. Doch in diesem Fall dient es ja nur dazu, den Stempel zu erstellen. Mit ihm lassen sich dann die benötigten Myriaden von Computerchips produzieren.

Extrem kleine Fehlertoleranzen

Größere Probleme sind bei der Ausdehnung der Stempelfläche auf mehrere Quadratzentimeter zu erwarten. Die Chiphersteller würden ihre Halbleiterwafer aus hochreinem Silizium nämlich gerne mit nur einem Stempelvorgang verarbeiten. Dazu müsste der Durchmesser des Laserstrahls mehr als verzehnfacht werden, was beträchtliche Schwierigkeiten bereiten dürfte. Auch muss sich erst noch zeigen, wie genau aufeinander folgende Stempelabdrücke sind – die Fehlertoleranzen in der Halbleiterindustrie sind extrem klein.

Chou und seine Kollegen können jedoch bereits mit einem weiteren Vorzug von Ladi auftrumpfen: Es eignet sich nicht nur zur Herstellung von Chips aus teuren Silizium-Einkristallen, sondern auch zur Bearbeitung von Polysilizium, das aus vielen gegeneinander verschobenen Kriställchen besteht. Ebenso lassen sich mit etwas Glück schon bald andere Halbleitermaterialien, die in der industriellen Produktion von Mikrochips eingesetzt werden, mit Ladi strukturieren.

Noch ist nicht absehbar, ob und wann das Verfahren die Massenproduktion von Chips übernimmt. Während die Princeton-Forscher fest daran glauben, dass ihre Technik die Gültigkeit von Moores Gesetz für mehr als ein Jahrzehnt sichern könnte, sind die Chiphersteller vorsichtiger. Schon vor mehreren Monaten hat Intel offiziell Fotolithografiemaschinen einer niederländischen Firma bestellt, die mit extrem ultraviolettem Licht arbeiten – und mehr als 20 Millionen Dollar kosten. Die Manager wollen wohl auf Nummer sicher gehen. So können sie erst einmal ruhig schlafen, während sie von Chipstempeln und den weiteren fetten Jahren mit satten Gewinnquoten, die sie ermöglichen würden, einstweilen nur zu träumen wagen.

Stefan Maier promoviert in angewandter Physik am California Institute of Technology in Pasadena.

MIKROBIOLOGIE

Der Gemeinschaftssinn der Bakterien

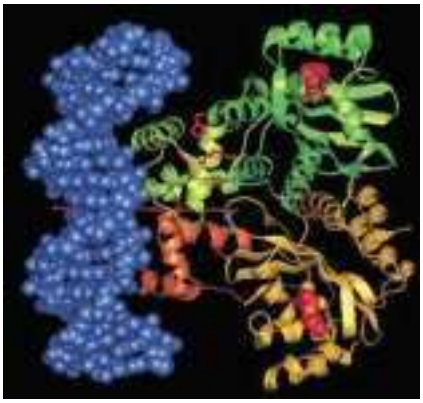
Viele Mikrobenarten können ihre eigene Bevölkerungsdichte ermitteln und ihr Verhalten darauf einstellen. Untersuchungen der molekularen Grundlagen dieses Phänomens ergaben nun Überraschendes.

Von Michael Groß

Die Unterscheidung zwischen Einzellern (Bakterien, Archäen, Urtierchen, Hefen) und den »höheren« vielzelligen Organismen, zu denen alle Tiere und Pflanzen zählen, scheint eine der grundlegendsten und einfachsten Einteilungen der Biologie zu sein. Bei genauerem Hinsehen entpuppt sie sich jedoch als trügerisch. So beginnt selbst der Mensch seinen Lebenslauf als Einzeller. Umgekehrt durchläuft die Amoebe *Dictyostelium*, gängiges Paradebeispiel eines Urtierchens (Protozoons), einen komplizierten Lebenszyklus, in dem sie mal als Kolonie von Einzellern, mal als pflanzenartiger Vielzeller auftritt. Erst vor kurzem konnte sie anhand einer teilweise vollendeten Genomsequenz richtig in den Stammbaum des Lebens eingeordnet werden (bei den Tieren statt den Pflanzen). Und wie sieht es mit den Bakterien aus?

Nach alter Lehrbuchweisheit handelt es sich um Einzeller, die in der Gegend herumschwimmen, solange sie genug Nährstoffe haben, und sich nach einer gewissen Zeit in zwei Tochterzellen aufteilen. Nun folgen Bakterien diesem simplen Muster exponentiellen Wachstums zwar, wenn sie im Labor gezüchtet werden. Doch draußen in der freien Natur pflegen sie teils einen ganz anderen Lebensstil. Viele von ihnen treten überhaupt nicht als Einzelkämpfer in Erscheinung, sondern sind normalerweise in Zweckgemeinschaften mit fremden Lebewesen eingebunden, indem sie zum Beispiel – wie Verdauungsbakterien oder photosynthetische Bakterien in Flechten – symbiotische Beziehungen mit anderen Arten unterhalten.

Doch auch mit ihresgleichen können Mikroben Verbände bilden, die erstaunlich organisiert sind. Gewisse Gemeinschaftsaktionen, etwa Lumineszenz oder Erzeugung von Giftstoffen, die ihren Wirt angreifen, unternehmen sie erst, wenn sie so zahlreich sind, dass sich die Mühe auch lohnt. Um festzustellen, wie viele ihrer Artgenossen anwesend sind, benutzen die Bakterien eine Art der chemischen Kommunikation, die man Quorum Sensing nennt. Sie scheiden einen Signalstoff (Autoinducer oder Pheromon) aus und messen dann mit Hilfe eines spezifischen Rezeptors die Konzen-



ANDRZEJ JOACHIMIAK ET AL. / NATURE, BD. 417, S. 971

Zwei Moleküle des TraR-Proteins (das obere grün/gelbgrün, das untere orange/braun gezeichnet) verankern sich mit ihren Greifarmen (gelbgrün/orange) in der großen Furche der DNA-Helix (blau), sobald die Bindung eines Pheromon-Moleküls (rotes Kugelmodell) in den Steuereinheiten (grün/braun) bewirkt, dass sich die Greifarme schließen.

tration dieses Stoffs. Sind nur wenige Artgenossen anwesend, so verflüchtigt sich das Pheromon durch Diffusion schneller, als es nachgeliefert wird. Ist dagegen eine gewisse kritische Dichte der Population überschritten, baut sich eine nachweisbare Konzentration des Signalstoffs auf.

Entdeckt wurde dieses Phänomen bei den Leuchtbakterien der Art *Vibrio fischeri*. Sie schalten ihr Licht erst an, wenn genügend von ihnen anwesend sind. Dann befinden sie sich nämlich als Schmarotzer im Leuchtorgan eines Tintenfischs und revanchieren sich für die Gastfreundschaft, indem sie ihrem Wirt zu einem Scheinwerfer für die bessere Orientierung in der nachtschwarzen Tiefsee verhelfen.

In den 1980er Jahren gelang es, den zugehörigen Signalstoff und die für seine Wirkung verantwortlichen Gene zu identifizieren. *Vibrio* wurde so zum klassischen Modell dieses Kommunikationssystems, das man in jener Zeit noch für eine Besonderheit der Leuchtbakterien hielt. Erst in den 1990er Jahren fanden britische Wissenschaftler an den Universitäten Warwick und Nottingham heraus, dass die Synthese von Antibiotika in *Erwinia carotovora* auf ähnliche Weise reguliert wird. Seitdem hat sich gezeigt, dass Quorum Sensing bei zahlreichen Arten in vielerlei Zusammenhängen auftritt. Ein wichtiges Beispiel ist das Verhalten von Krankheitserregern, welche die Produktion ihrer Angriffswaffen erst ankurbeln, wenn sie in ausreichender Zahl im Wirtsorganismus versammelt sind.

Obwohl über die genetischen Voraussetzungen der Bakterienkommunikation mittlerweile umfassendes Material existiert, lagen die genauen molekularen Wirkungsweisen der Signalstoffe und ihrer Rezeptoren bis vor kurzem noch im Dunkeln. Jetzt wurden erstmals zwei solche Rezeptoren zusammen mit den zugehörigen Pheromonen per Röntgenstrukturanalyse aufgeklärt. In beiden Fällen enthüllte der genaue Blick Ungeahntes.

Die Arbeitsgruppe von Frederic Hughson an der Universität Princeton (New Jersey) hatte besonderes Glück, als sie ein Rezeptorprotein namens LuxP aus dem Leuchtbakterium *Vibrio harveyi* kristallisierte (*Nature, Bd. 415, S. 545*). Bei der Auswertung der Röntgenbeugungsdaten erhielten die Forscher nicht nur die Struktur des Proteins, sondern auch die des daran gebundenen Pheromons: des Autoinducers AI-2. Von dem hatte man bis dahin nicht einmal die chemische Zusammensetzung gekannt, obwohl es sich um einen Signalstoff handelt, der von vielen Arten benutzt wird und möglicherweise sogar der Kommunikation zwischen unterschiedlichen Spezies dient. Das unerwartet aufgefundene Signalmolekül aber barg eine weitere Überraschung: das erste Auftreten von Bor in einem Biomolekül. Man wußte zwar schon lange, dass dieses Metall für manche Organismen ein essenzielles Spurenelement ist und demzufolge eine biologische Funktion haben muss, doch worin sie bestehen könnte, war völlig offen.

Signal und Schalter zugleich

Nur wenige Monate später veröffentlichte die Arbeitsgruppe von Andrzej Joachimiak am Argonne-National-Laboratorium (Illinois) die Struktur einer weiteren bakteriellen Kommunikations-Antenne, die allerdings in einem ganz anderen Zusammenhang von Bedeutung ist. Der Schädling *Agrobacterium tumefaciens* trägt seinen Namen, weil er bei bestimmten Feldfrüchten tumorartige Wucherungen auslöst. Dabei garantiert ein kompliziertes Netz aus Signalwegen, dass das Bakterium sein spezielles Genprogramm zur Infektion von Pflanzen erst anwirft, wenn es sich tatsächlich in einer solchen befindet und obendrein genügend Artgenossen mitmachen.

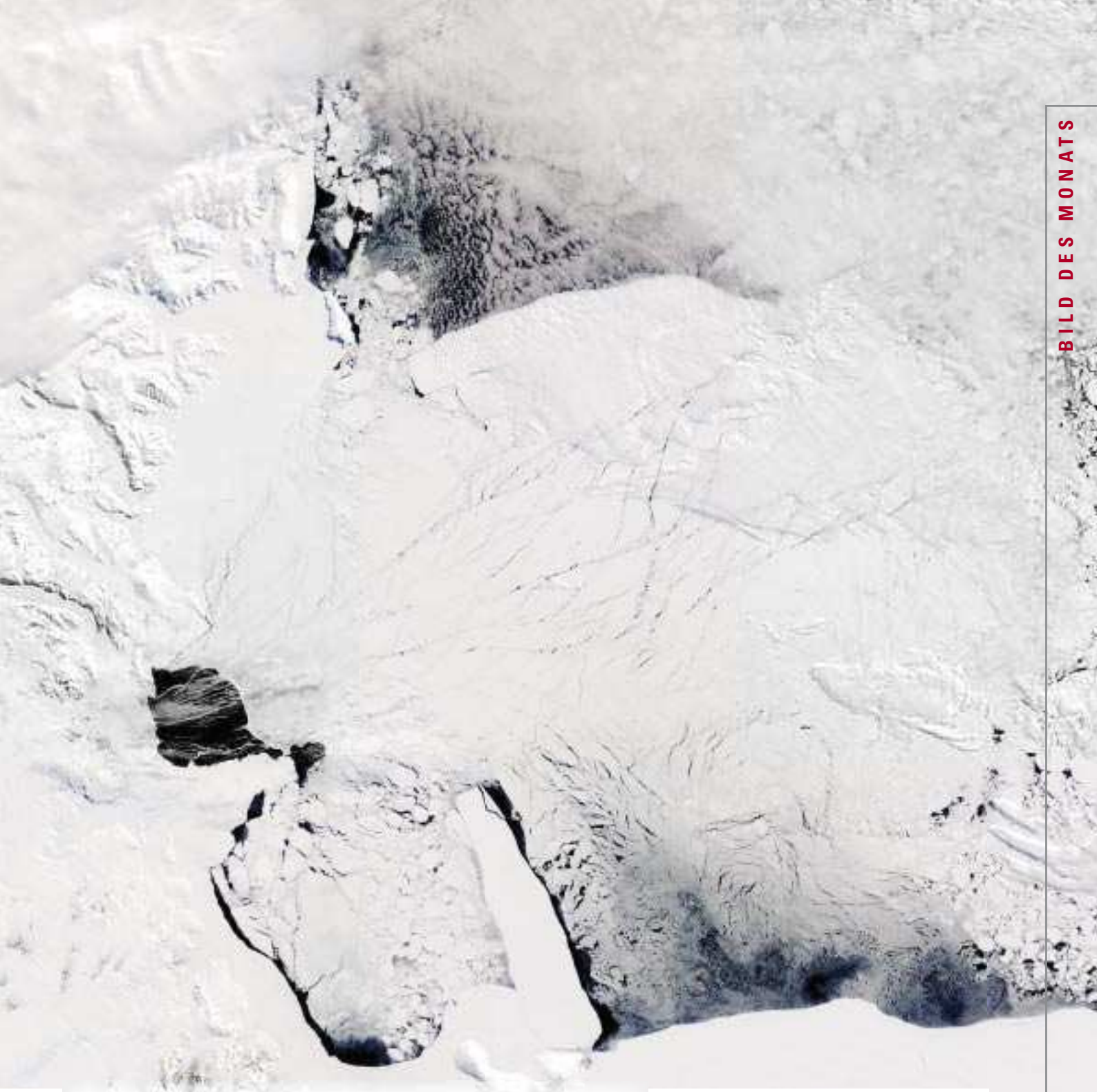
Entdeckt die Mikrobe gewisse Nährstoffe ihres pflanzlichen Opfers, schaltet sie die Produktion eines Proteins namens TraR an, um Funkkontakt mit potenziellen Mitstreitern aufzunehmen. Dieser Eiweißstoff fungiert als Antenne für den artspezifischen Autoinducer, ist aber zugleich auch ein Schalter, der für die Ablesung von gewissen Genen sorgt, sobald das Pheromon angedockt hat. Während Kommunikationswege in Tieren und Pflanzen typischerweise eine Reihe von Schritten vom Rezeptor in der Zellmembran bis zur Aktivierung der Gene im Zellkern umfassen, stellt TraR also eine direkte Verbindung zwischen Signalempfang und Genexpression her.

Joachimiak und seine Mitarbeiter suchten dies auszunutzen und kristallisierten das Protein in Anwesenheit des Autoinducers sowie eines geeigneten DNA-Fragments. Tatsächlich gelang es ihnen auf diese Weise, die Struktur eines vollständigen Komplexes aus allen drei Komponenten zu entschlüsseln (*Nature, Bd. 417, S. 971*). Auf je eine DNA-Doppelhelix kamen zwei TraR-Moleküle, von denen jedes ein Exemplar des Signalstoffs fest umschlossen hielt (Bild). Dieser Klammergriff legt nahe, dass das Protein in Abwesenheit des Autoinducers eine ziemlich offene Struktur hat und flexibel genug bleibt, um sich um das kleinere Molekül herumwinden zu können.

Das erklärt einige biochemische Beobachtungen wie die Empfindlichkeit des ungebundenen TraR gegenüber Verdauungsenzymen und die Festigkeit der Bindung an den Autoinducer, von dem es sich allein nicht mehr lösen kann. Außerdem macht dies die Kopplung der Rezeptorfunktion an die Endwirkung, die Funktion als Transkriptionsfaktor, verständlich. Nur wenn sich das Protein um das »Gerüst« des Autoinducers herumgewickelt hat, nimmt es die richtige Doppelkopf-Struktur an, mit der es die angepeilte DNA-Sequenz binden und die Genfunktion anknipsen kann.

So bemerkenswert diese ersten Einblicke sind, steht die Erforschung der Kommunikation zwischen Bakterien doch erst am Anfang. Bisher gibt es nur wenige Befunde an einzelnen Mikroben, wobei unklar bleibt, inwieweit sie artspezifisch oder allgemein gültig sind. So darf man von der fortschreitenden Erkundung dieses Gebiets noch etliche Überraschungen erwarten. Eines zeichnet sich freilich jetzt schon ab: Bakterien sind keineswegs so primitiv und dumm, wie wir ihnen in unserer menschlichen Überheblichkeit gerne unterstellen.

Michael Groß ist Biochemiker und als freier Autor mit dem Birkbeck-College in London assoziiert.



Antarktische Eisberge

Vom Schelfeis der Antarktis sind in den letzten Jahren ungewöhnlich große Stücke abgebrochen. Im vergangenen Frühjahr hat sich das Eisschelf Larson B dadurch vollständig aufgelöst. Aber auch das größere Ross-Eisschelf weiter südlich ist betroffen. Von ihm spaltete sich im März 2000 ein Eisberg von der Größe Schleswig-Holsteins ab, der inzwischen zerbrochen ist. Das größte Fragment von immer noch 180 Kilometern Länge ragt auf diesem Bild des Satellitensensors Modis vom 17. 11. 2002 wie ein Splitter vom Ross-Eisschelf (glatte weiße Fläche rechts unten) weg. Ein zweiter riesiger Eisbrocken, der letzten Mai abbrach und 200×32 Kilometer misst, ist schon weiter abgedriftet. Er erstreckt sich »waagrecht« unter der offenen Wasserfläche oben in der Bildmitte. Ob das vermehrte Kalben des antarktischen Schelfeises von der globalen Erwärmung herrührt, ist nicht sicher, aber viel spricht dafür. Der Meeresspiegel erhöht sich dadurch zwar nicht. Doch könnte die Auflösung der schwimmenden Eispanzer am Rand der Antarktis den Abstrom des Inlandeises durch Gletscher erleichtern. Dessen Schmelzen ließe den Meeresspiegel beträchtlich ansteigen.

1953

Fernseheinfluß auf die Jugend

Englische Psychologen untersuchten die in den USA schon seit längerer Zeit diskutierte Frage, wie das Fernsehen auf die seelische Entwicklung von Kindern und Jugendlichen wirkt. Diese bleiben am Abend öfter daheim, seit es das Fernsehen gibt. Aber man sollte sich keinen Täuschungen darüber hingeben, daß dadurch in allen Fällen der Zusammenhalt der Familien gefördert werde; stundenlanges untätiges Sitzen vor dem Television-Schirm mache das Leben vieler Jugendlicher, die bisher einen ganzen Teil der Abende im Kreise von Altersgenossen zubrachten, ärmer. *(Deutsche Medizinische Wochenschrift, Nr. 5, Januar 1953, S. 180)*

Ein Elektromotor in der Armbanduhr

Die Herstellung elektrischer Armbanduhren ist noch zu kostspielig für eine Serienfertigung. Winzige Batterien versorgen einen ebenso winzigen Elektromotor mit Strom. Der hin- und herschwingende Rotor des Motors … des amerikanischen Modells ist 1 mm lang …; ihm ist ein isolierter Kupferdraht in 3000 Windungen aufgewickelt. Von der französischen Konstruktion sind erstaunliche Zahlen bekannt: Der Durchmesser des Wicklungsdrahtes beträgt ein hundertstel Millimeter und die Lebensdauer der Batterie zwei Jahre. Nach acht Monaten wich der Gang nur wenige Sekunden ab. *(Westermanns Monatshefte, 94. Jg., Heft 1, S. 82, 1953)*

Tieraugen als Objektiv

Die Messungen der photographischen Charakteristiken der Tieraugen werden dazu beitragen, unser Wissen von der Physiologie des Sehens zu bereichern. … Man schnitt eine kleine Öffnung in die Rückseite eines Schafsauges und verschloß sie mit einem erbsengroßen Stück Film. Das Auge wurde in einen Metallrahmen eingefügt, der einen Compur-Verschluß mit 1/100 Sekunde enthielt. Auf diesem Wege erzielte man annehmbare Schwarzweiß- und Farb-Bilder. Messungen ergaben, daß das Schafsauge einem

Mit Tieraugen aufgenommene Photos sind wegen der Krümmung dieser Augen stark verzeichnet

Objektiv mit einer Lichtstärke zwischen f 1.9 und 3.0 gleichkommt. Das Auge war etwa 10 cm vom Aufnahmeobjekt entfernt … Damit wurde aber noch nicht bewiesen, daß das Auge Dinge sieht wie eine Photographie. Man nimmt an, daß das Bild erst im Gehirn entsteht, wo die Eindrücke der Netzhaut in ein geistiges Bild übertragen werden. *(Photomagazin, 5. Jg., S. 13, 1953)*

Gewichtsverlust radioaktiver Substanzen

5 g des radioaktiven Präparates wurden in ein Glasröhrchen eingeführt und das Gewicht desselben mehrere Wochen lang mit dem eines ganz ähnlichen, mit Glasstücken angefüllten Röhrchens verglichen. Es zeigte sich das überraschende Resultat, dass die radioaktive Substanz täglich etwa 0,02 mg an Gewicht verlor. Wenn man nun Berechnungen Becquerels, die von der Hypothese ausgehen, dass die Radiumstrahlen aus materiellen, weggeschleuderten Teilchen bestehen, auf die untersuchte Substanz anwendet, so findet man, dass ihr Energieverlust eine auffallende Übereinstimmung damit zeigt. *(Die Umschau, 7. Jg., Nr. 3, S. 57, 1903)*

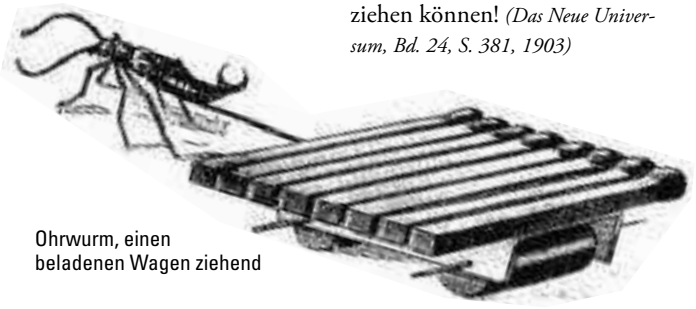
Feuersichere Bekleidungsstoffe

Für Feuerarbeiter müsste Stoff vor der Verarbeitung feuersicher gemacht werden, um zu verhüten, dass die Kleider … bei unvorherzusehender Berührung mit glühenden Körpern … in Brand geraten. In englischen Werkstätten benutzt man zum Feuersichermachen leinener Stoffe phosphorsaures Ammoniak. Man stellt eine Lösung von etwa 1 Th. phosphorsaures Ammoniak und 10 Th. Wasser her, tränkt den Stoff und trocknet ihn bei gelinder Wärme. Beim Waschen gebrauchter leinener Arbeitskleider fügt man ein entsprechendes Quantum der Lösung dem Stärkebrei hinzu; nach dem Bügeln sind die Kleider dann vollständig feuersicher. Kommen sie mit einem glühenden Körper oder einer Flamme in Berührung, dann verkohlen dieselben wohl an der Berührungsstelle, aber sie lodern nicht auf. *(Hannoversches Gewerbeblatt, Nr. 1, S. 5, 1903)*

1903

Die Kraft eines Ohrwurms

Der Öhrling oder Ohrwurm, ein ganz unschuldiger Geradflügler, ist manchen Menschen als nächtliches Tier etwas unheimlich … Gefährlich ist aber das Tier gar nicht. … Es ist 14 bis 20 mm lang, sehr zart und geschmeidig. … Ein Naturforscher hat sich die unendliche Mühe gemacht, einen Öhrling vor einen kleinen Wagen zu spannen, den er aus dünnem Karton verfertigt hatte, und konnte den Wagen mehr und mehr mit schwedischen Streichhölzern beladen, ohne daß das Tier am Vorwärtsgehen behindert gewesen wäre. Als schließlich acht Hölzer aufgelegt waren, ging der Ohrwurm mit langsamen Schritten, … etwa wie ein vor einen schweren Lastwagen gespanntes Pferd. Der Wagen mit den acht Hölzern wog das Vierundzwanzigfache des Tieres. Welche Last müßte entsprechend ein Pferd ziehen können! *(Das Neue Universum, Bd. 24, S. 381, 1903)*



Ohrwurm, einen beladenen Wagen ziehend

Die Evolution des Menschen

Vor zwei Jahrzehnten glaubten Forscher noch an eine einzige Hauptentwicklungslinie bei den Hominiden: Diese führte zum modernen Menschen. Neue Fossilien und Forschungsmethoden haben das Bild revidiert.

Von Pascal Picq

SERIE

25 Jahre Spektrum DER WISSENSCHAFT

In dieser 12-teiligen Serie berichten prominente Forscher aus ihrem Fachgebiet über wissenschaftliche Highlights der letzten 25 Jahre, die aktuelle Situation und künftige Perspektiven.

Teil I: PALÄOANTHROPOLOGIE

Im nächsten Heft
Teil II: Stringtheorie

Das Bild von der Evolution des Menschen hat sich in den letzten Jahrzehnten gründlich gewandelt. Nehmen wir nur eine der jüngsten Entdeckungen: Ausgerechnet in Zentralafrika hätten Anthropologen in den 1970er Jahren bestimmt keine extrem frühen Hominiden erwartet. Doch der Toumai-Schädel aus der Djourab-Wüste im Tschad, der im Sommer 2002 einigen Medienrummel auslöste, scheint manche Merkmale bereits nicht mehr aufzuweisen, die unser letzter mit den Schimpansen gemeinsamer Vorfahr noch besessen haben dürfte (siehe Bild Seite 24 oben). Mit seinem vermuteten Alter von über sechs Millionen Jahren dürfte dies derzeit der mutmaßlich älteste Vertreter unter den Vormenschen sein.

Eines hat das letzte Vierteljahrhundert klar erwiesen: Der Mensch entstand in Afrika. Ansonsten ist heute vieles strittig, auch die Abgrenzung der menschlichen Gattung *Homo*. Das riesige Forschungsfeld, das die Herkunft des Menschen untersucht, umfasst inzwischen verschiedenste wissenschaftliche Disziplinen, von den Geo- bis zu den Molekularwissenschaften, die mit neuen Untersuchungsmethoden und wissenschaftlichen Konzepten die Evolution des Menschen aufzuklären suchen. Fossilien und die Geschichten, die sie erzählen, machen nur einen kleinen Teil der Untersuchungsobjekte aus. Trotzdem fesseln alte Knochen und andere Zeugnisse der Vorzeit das Interesse von Laien wie Fachleuten in besonderem Maße.

Dies gilt auch für die zahlreichen Fossilfunde der 1970er Jahre. Vor allem ostafrikanische Grabungen machten damals von sich reden. Als spektakulär galt bereits der Fund von Beinknochen samt Kniegelenk von einem Hominiden, der vor über drei Millionen Jahren lebte und aufrecht ging. Forscher entdeckten ihn in der Afar-Wüstenregion in Äthiopien. Ein Jahr später, 1974, fanden sie im gleichen Gebiet »Lucy«, das wohl berühmteste Skelett der Vorgeschichte. Auch diese *Australopithecus*-Frau ging schon aufrecht. Ende der 1970er Jahre stießen Wissenschaftler in Tansania auf die fossilen Fußspuren von Laetoli (siehe Bild Seite 25). Sie bewiesen zweifelsfrei: Vor dreieinhalb Millionen Jahren waren hier mindestens zwei aufrecht gehende Primaten entlangmarschiert.

Zur gleichen Zeit entdeckten Forscher zudem in Südäthiopien die Ablagerungsschichten bei Omo. Diese Sedimente erzählen durchgehend von der Klimaentwicklung in der entscheidenden Phase vor dreieinhalb bis zwei Millionen Jahren, als die menschliche Gattung – *Homo* – entstanden sein muss. Ostafrikanische Funde veranlassten die Anthropologen damals auch zu einem ersten Umdenken über den Hominiden-Stammbaum: Neue Fossilien von *Australopithecus*-Arten – die ein ähnliches Alter hatten wie die ältesten behauenen Steinwerkzeuge und die Funde von den ersten Menschen, also Angehörigen der Gattung *Homo* – schürten den Verdacht, dass in Ostafrika früher zwei ganz verschiedene aufrecht gehende Hominiden zeitgleich nebeneinander gelebt hatten.

Bei Lucys Entdeckung und noch bis Anfang der 1980er Jahre sahen Anthropologen die Evolution der Hominiden im Wesentlichen als eine stufenweise Höherentwicklung an, ohne viele Abzweige und Seitenwege. Sie glaubten, aus gewöhnlichen Affen seien die Menschenaffen hervorgegangen, aus diesen die Australopithecinen (Vormenschen) wie Lucy, und aus denen später die Gattung *Homo*. Dann ging es vermeintlich genauso in einer Einbahnstraße Schritt für Schritt weiter. Zuerst kam *Homo*

ANTJE JUSTUS / RÖMISCH-GERMANISCHES ZENTRALMUSEUM MAINZ

Vielleicht sah so auch der Schädel der ersten Europäer aus. Schon vor fast 1,8 Millionen Jahren hatten Menschen die Südflanke des Kaukasus erreicht. Der oben abgebildete Schädel stammt aus Dmanisi.

habilis, aus ihm entwickelte sich *Homo erectus*, aus dem wiederum *Homo sapiens*. Dieser bildete zwei Unterarten: den modernen Menschen, *Homo sapiens sapiens*, und daneben den Neandertaler, *Homo sapiens neanderthalensis*. So falsch und veraltet steht es immer noch in vielen Schulbüchern.

Erweiterte Verwandtschaft

Als Vorfahren der in Afrika heimischen Australopithecinen hatten eine Zeit lang die asiatischen Ramapithecinen gegolten. Von diesen Menschenaffen sind nur ein paar Kieferbruchstücke überliefert. Dennoch schrieben die Forscher ihnen einen halb aufgerichteten Gang zu, eine Zwischenstufe zwischen der Fortbewegungsweise etwa von Schimpansen und *Australopithecus*. Sie rechneten aus, dass sich unsere Vorfahren vor über fünfzehn Millionen Jahren von den Menschenaffen abgespalten hatten.

Die aufblühende Molekularbiologie half dann, die Zeitvorstellungen und Verwandtschaftsverhältnisse zurechtzurücken. In Äthiopien hatte der wieder aufflackernde Eritrea-Krieg den ergiebigen Feldkampagnen 1977 ein Ende gesetzt. In anderen Staaten, wie Kenia oder Tansania, gelangen Paläoanthropologen zwar auch weiterhin bedeutende Entdeckungen. Aber zunehmend gewannen nun molekulare Studien Gewicht in Fragen zur Herkunft des Menschen.

Während der 1970er Jahre stellten Forscher Vergleiche von verschiedenen Molekülen der niederen Affen, Menschenaffen und des Menschen an. So untersuchten sie Antikörper des Immunsystems, Chromosomen und Erbsequenzen. Das Ergebnis: Der Mensch ist mit den afrikanischen Menschenaffen, Gorilla und Schimpanse, viel näher verwandt als mit dem in Südostasien heimischen Orang-Utan. Das passte zu neueren Ergebnissen der vergleichenden Systematik. Sie ordnet Arten nicht mehr nach Entwicklungsstufen, also nicht mehr in hierarchische Entwicklungsreihen, sondern sortiert die Organismen nach gemeinsamen Vorfahren. Alle Formen, die von daher das gleiche neue Merkmal erbten, werden in eine Gruppe zusammengestellt.

Die frühere Vorstellung, dass alle heutigen Menschenaffen eine gemeinsame systematische Familie, die Pongiden, bilden, war damit nicht mehr zu halten. Vielmehr sollte nur noch der Orang-Utan dazugehören. Schimpanse und Gorilla sind nach diesen Studien Hominiden. Sie ▷

MICHEL BRUNET © M.P.F.T.

Für Schlagzeilen sorgte jüngst dieser über sechs Millionen Jahre alte Schädel. Er stammt aus dem Tschad. Nach Ansicht seiner Entdecker gehört dieser Hominide in die nahe Verwandtschaft von Menschenvorfahren.

▷ stehen einander und dem Menschen näher als dem Orang-Utan.

Die Molekularanthropologen wagten auch eine Altersschätzung für den letzten gemeinsamen Vorfahren der afrikanischen Menschenaffen und des Menschen. Sie schufen das Konzept der molekularen Uhr. Danach ereignen sich Mutationen in den Bausteinen des Genoms mit einer statistisch etwa gleichen zeitlichen Rate. Folglich spiegelt die Anzahl von unterschiedlichen Bausteinen bei zwei Arten mit einer gewissen Unschärfe die Zeit wider, seit beider Abstammungslinien sich voneinander abspalteten. Der Schätzwert für den Menschen und die afrikanischen Menschenaffen grenzt die Aufspaltung beider Linien auf drei bis zehn Millionen Jahre vor heute ein, wobei der Zeitraum vor fünf bis acht Millionen Jahren plausibel erscheint. Der gemeinsame Vorfahr rückte uns näher.

Immer besser war zu erkennen, wie – und wo – die menschliche Evolution stattgefunden hatte. Anfang der 1980er Jahre wurde das Modell der »East Side Story« populär. Auffallenderweise stammten alle damals bekannten Fossilien von ostafrikanischen Vormenschen aus heute relativ trockenen Regionen östlich des großen Grabenbruchs, der Ostafrika nordsüdlich durchzieht. Schimpansen und Gorillas leben hingegen in den Regenwäldern westlich davon. Vor rund acht Millionen Jahren begann sich an dieser Stelle, wo Afrika auseinander reißt, eine geografische Barriere zu bilden, die sich auch auf das Klima zu beiden Seiten auswirkte. Im Westen hielt sich Regenwald. Im Osten aber wurde es zunehmend trockener. Dort breiteten sich allmählich immer mehr Savannen und baumarme Grasflächen aus.

In dieser Umwelt, so vermuteten die Forscher, entwickelten sich die Australopithecinen und der Mensch. Hier, östlich des Grabenbruchs, konnten der aufrechte Gang und die anderen Merkmale der menschlichen Linie entstehen. In den Wäldern im Westen entstanden aus Populationen des gemeinsamen Vorfahren Schimpansen und Gorillas. Obwohl dieses Modell Widerspruch erntete, lenkte es doch die Aufmerksamkeit auf den Einfluss von Umweltänderungen in der Hominidenevolution.

Die Olduvaischlucht in Ostafrika (hier ein Blick in Nordtansania) gehört zu den berühmtesten Fundstätten von Früh- und Vormenschen.

IMAGINE / HOA-QUI / DENIS HUOT

Kein Kulturmonopol

Als sich die Fossilien in den 1970er Jahren anhäuften, animierte dies besonders jüngere Wissenschaftler dazu, sie der ganzen Palette modernster technischer Untersuchungsverfahren zu unterziehen. Zähne, Knochen und Gelenke gaben ihr Wachstum, ihre Abnutzungsspuren und ihre biomechanischen Eigenschaften preis. Die Forscher enthüllten so von Lucy, wie sie gegangen war und Kinder gebar, wie sie sich ernährte und auch wie sie in der Jugend wuchs.

Die Zeit vor rund eineinhalb bis zwei Millionen Jahren, als schon die ersten Menschen lebten und behauene Steinwerkzeuge hinterließen, fällt bereits in das Feld der Archäologen. Sie versuchten an den ältesten archäologischen Fundplätzen abzulesen, wie die ersten Menschen mit Umweltressourcen umgingen. Was sie dabei in Detailarbeit zusammentrugen, dünkte vielen wenig schmeichelhaft für uns Menschen. Denn anscheinend ernährte sich *Homo habilis*, klein und noch teilweise baumlebend, kaum von der Jagd, sondern von Aas. Ein Mythos stürzte ein.

Die moderne Ethologie mit ihren neuen Ideen zur Evolution von Verhalten gewann in Fragen der Menschwerdung erst spät Gewicht. Bis Anfang der 1980er Jahre hatten Anthropologen für Modelle vom Leben der frühen Menschen hauptsächlich ethnologische Berichte und mehr oder weniger richtige Annahmen über heutige Jäger- und Sammlerkulturen herangezogen. Die neuen Paradigmen der Verhaltensbiologie seit den 1960er Jahren, die Verhaltensstrategien aus ökologischen Zwängen und in der Evolution geformten sozialen Motiven heraus erklären, ignorierten sie weitgehend.

Primatologen führten schließlich die Wende herbei. Mitte der 1980er Jahre erstellten sie die ersten Übersichtsarbeiten über die Sozio-Ökologie der Affen und Menschenaffen. Als Erste bezogen sie auch den Menschen in solche vergleichenden Verhaltensstudien ein, die ökologische Anpassungen beschreiben. Sie wagten dabei jene alten Modelle in Frage zu stellen, in denen ausschließlich die Jagd, der Werkzeuggebrauch, das Gruppenleben und allenfalls noch das Nahrungsteilen die Menschwerdung auslösten. Nun zeigten Primatologen auf, dass nah verwandte Affenarten in Anpassung an ihre spezifische Umwelt und deren Klima unterschiedlich leben, was sich bis in das soziale Miteinander auswirkt. Einige haben sich hervorragend an ziemlich trockene Bedingungen adaptiert. Deren Studium

erwies sich als sehr fruchtbar auch für das Verständnis von Anpassungen bei der Menschwerdung, weil sich diese Evolution in teilweise vergleichbaren Lebensbedingungen der Savanne vollzog. Sofern bei solchen Vergleichen die vorgegebenen Unterschiede der betrachteten Gruppen berücksichtigt werden, lassen sich weit reichende Modelle über frühe aufrechte Hominiden der Savanne entwickeln.

Freilandbeobachtungen an Menschenaffen, die um 1960 anfingen, rückten die Sonderstellung des Menschen in ein anderes Licht. Vor allem Schimpansen galten zunächst als Modell für die Lebensweise unserer frühen Vorfahren. Inzwischen machen ihnen darin die Bonobos (eine erst spät erkannte eigene Menschenaffenart) Konkurrenz. Freilandstudien an ihnen begannen 1974, in dem Jahr, in dem Lucy gefunden wurde. Es ist hier nicht so wichtig, welcher von beiden Menschenaffen näher mit uns verwandt ist. Denn beide zeigen, dass die Vorstellung nicht zutrifft, nur der Mensch besitze eine Kultur. Diese Primaten gehen unter anderem bereits mit Werkzeugen um und tradieren deren Gebrauch. Sie jagen und fressen Fleisch. Man darf annehmen, dass unser mit ihnen gemeinsamer Vorfahre all das auch schon tat.

Unterschätzte Neandertaler

Dem so genannten modernen Menschen ging es nicht besser. Vor allem hat sich sein Verhältnis zum Neandertaler verändert. So erwiesen in den 1980er Jahren neue Datierungsmethoden, dass im Nahen Osten vor Neandertalern moderne Menschen lebten. Das waren Vorläufer des europäischen Cro-Magnon-Menschen (des ersten modernen Menschen in Europa). Moderne Menschen lassen sich in Palestina vor etwa 110 000 Jahren nachweisen, Neandertaler erst vor 90 000 Jahren. Beide hatten in diesem in der Vorzeit für die menschlichen Wanderungen so wichtigen Korridor sogar über mehrere Jahrzehntausende nebeneinander gelebt. Noch erstaunlicher: Kulturell gehören beide in dieselbe Kulturepoche der mittleren Altsteinzeit, ins Moustérien. Nicht länger konnte der moderne Mensch als die Menschenform mit der weiter entwickelten Kulturstufe gelten.

Zuverlässige Altersmessungen erwiesen nun auch für West- und Mitteleuropa, dass Neandertaler und moderne Menschen hier noch einige Jahrtausende lang nebeneinander existiert hatten. Der moderne Mensch kam vor 40 000 Jahren neu nach Europa. Die letzten Neandertaler lebten noch bis vor 32 000 Jahren. Sie waren im eiszeitlichen Klima Westeurasiens während einiger Jahrhunderttausende entstanden. Besonderes Aufsehen erregte ein Neandertaler-Fund von 1979 aus der Charente in Frankreich. Er gehört ins Châtelperronien, eine Kulturschicht der oberen Altsteinzeit, die bisher als Kultur des modernen Menschen galt. Dies bewies, dass die Neandertaler eine viel weiter entwickelte Kultur besaßen als bisher angenommen.

Erst Mitte der 1990er Jahre kam heraus, dass moderne Menschen bereits am Ausgang jener Phase Kunst von großer Ausdruckskraft schufen. Die reichen Wand- und Deckenmalereien in der 1994 entdeckten Höhle von Vallon-Pont (Grotte Chauvet) hätten Experten vom Stil her früher auf 20 000 Jahre geschätzt. Doch physikalische Datierungen ergaben das erstaunlich hohe Alter von 32 000 Jahren.

In den 1980er Jahren stellte sich die Frage neu, wo der moderne Mensch entstanden war. Vielen Paläoanthropologen erschien es damals als wahrscheinlich, dass er sich in mehreren Regionen der Alten Welt aus den lokalen *Homo-erectus*-Populationen entwickelt hatte. Durch genetischen Austausch zwischen diesen Populationen sollte sich eine gemeinsame Art herausgebildet haben. Andere Forscher vermuteten, dass der moderne Mensch von Afrika aus die Welt erobert hatte und ansässige Bevölkerungen verdrängte.

Die Wogen kochten hoch, als amerikanische Wissenschaftler 1987 die »afrikanische Eva« vorstellten. Genauer gesagt postulierten sie aus Erbgut-Vergleichen heutiger Bevölkerungen eine rein afrikanische Abstammung des modernen Menschen, zumindest in weiblicher Linie. Ähnlich wie bei den vorn erwähnten Messungen des Alters verschiedener Primatenlinien mittels einer »molekularen Uhr« hatten sie Mutationen in Erbsequenzen gezählt und daraus die Stammlinien rekonstruiert. In dem Fall hatten sie Erbgut der Mitochondrien untersucht, Zellorganellen, die nur von der Mutter vererbt werden. Sie errechneten daraus für den modernen Menschen ein Alter von ungefähr 200 000 Jahren.

Noch ist der Streit nicht entschieden. Die Molekularanthropologen möchten außerdem zweierlei auseinander halten: den Ursprung unserer Art einerseits und das genetische Erbe der heutigen Menschheit andererseits. Wohl könnte der moderne Mensch in Afrika entstanden sein. Es scheint aber, dass die Population irgendwann vor 100 000 bis 50 000 Jahren sehr klein wurde, dass sie zeitweilig auf rund 60 000 Individuen schrumpfte, also eine drastische Auslese erfuhr. Trotzdem soll der moderne Mensch nach diesem Modell zumindest den größten Teil der heutigen genetischen Ausstattung beigesteuert haben.

Natürlich kam dann die Frage nach dem hypothetischen Adam auf. Auch nach den männlichen Abstammungslinien fahnden Molekulargenetiker inzwischen, nun anhand des Y-Chromosoms. Die Resultate ergeben im Prinzip das Gleiche: eine afrikanische Herkunft des modernen Menschen. Kritiker stoßen sich aber an den- ▷

J. PAUL GETTY TRUST / NEVILLE AGNEW

Diese Fährte, die aufrecht gehende Hominiden vor dreieinhalb Millionen Jahren in feuchter Asche zurückließen, wurde Mitte der 1970er Jahre bei Laetoli im heutigen Tansania freigelegt. Vorn rechts lief ein Urpferd.

selben methodischen und analytischen Aspekten. Außerdem ergaben sich zwei unterschiedliche Alter: Die postulierte Eva hätte vor 150 000 Jahren gelebt, Adam vor nur etwa 50 000 Jahren. Die Abweichungen sind aber nicht so tragisch. Die Formulierung gibt den Sachverhalt verkürzt wieder, da die Studien in Wirklichkeit molekulare Entwicklungslinien aufzeigen. Sie behandeln Populationen, nicht Individuen. Die Eigennamen dienen nur der Veranschaulichung.

Vom Baum zum Busch

Die 1990er Jahre brachten eine Artenexplosion bei den Vormenschen – und öffneten das Fenster zugleich weiter in unsere Vergangenheit. Die bisher ältesten Australopithecinen waren rund dreieinhalb Millionen Jahre alt. Dann wurde 1994 *Australopithecus ramidus* beschrieben. Wie Lucy stammt der Fund aus der Afar-Wüste, nur ist dieses Fossil viereinhalb Millionen Jahre alt. Die Entdecker glaubten, eine Zwischenform zwischen dem letzten gemeinsamen Vorfahren von Schimpanse und Mensch und der Art von Lucy, *Australopithecus afarensis*, gefunden zu haben. Doch in den folgenden Jahren kamen in verschiedenen Ländern gleich eine ganze Serie weiterer sehr alter Arten neu hinzu (siehe Bild unten).

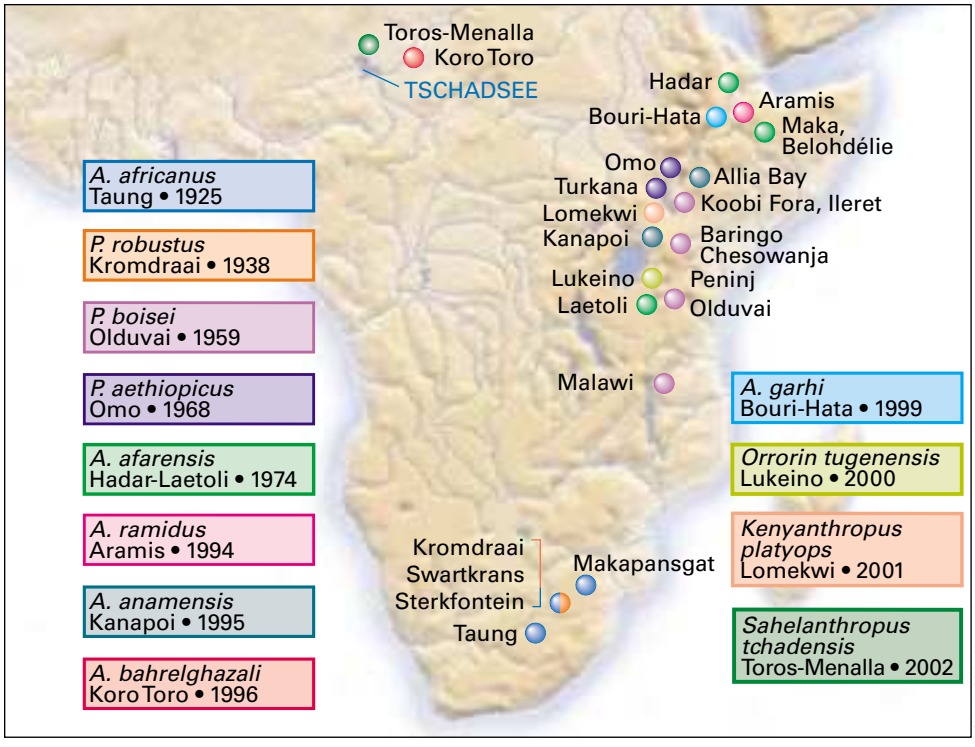
Den Anfang machte *Australopithecus anamensis* (Kenia), der vor etwa vier Millionen Jahren lebte. Ein Jahr später folgte die dreieinhalb Millionen Jahre alte Art *Australopithecus bahrelghazali* (Tschad). Als Nächstes kam der zweieinhalb Millionen Jahre alte *Australopithecus garhi* (Äthiopien) hinzu. Der nächste dieser Funde war *Kenyanthropus platyops* (Kenia), der über dreieinhalb Millionen Jahre alt sein dürfte. Und schließlich die jüngsten Funde und zugleich bisher ältesten dieser Fossilien: *Orrorin tugenensis* (Kenia) ist sechs Millionen Jahre alt, *Sahelanthropus tchadensis* (Tschad) wird sogar auf sieben geschätzt. Die Basis unseres Stammbaumes vor Erscheinen der Gattung *Homo* ist unübersichtlicher als je zuvor.

Was unsere eigene Gattung betrifft, haben die 1990er Jahre auch einiges aufgerührt. Zunächst machten ein paar Anthropologen sich über die ursprünglichste Menschenart her, den 1964 benannten *Homo habilis*. Jetzt verwiesen die Forscher auf die große Variabilität der Fossilien, die bisher hierunter eingeordnet wurden. Sie wollten dafür zwei Arten definieren: Zu *Homo habilis* im engeren Sinne sollten nur die grazileren, noch stark ans Baumleben angepassten Individuen gehören. Eine zweite Art, *Homo rudolfensis*, sollte die kräftiger gebauten, mehr ans Bodenleben angepassten Typen mit einem größeren Gehirn und menschenähnlicheren Gesichtsschädel umfassen.

Noch weiter ging ein paar Jahre später der Vorschlag, diese beiden Arten nicht länger der Gattung *Homo* zuzuordnen, sondern noch den Australopithecinen. Dann wäre erst *Homo ergaster* (sozusagen der afrikanische *Homo erectus*) der erste »echte« Mensch gewesen. Er war groß, starkknochig und ging fast schon genauso wie wir. Zu dieser Art gehört das eineinhalb Millionen Jahre alte Skelett von Turkana von einem über einen Meter siebzig großen, noch nicht ausgewachsenen Jugendlichen, das 1985 gefunden

Vor wenigen Jahren galten die Hominiden, von denen diese Fossilien stammen, als die ersten Zweibeiner. Die Speiche und das Schienbein gehören zu *Australopithecus anamensis*.

NATIONAL MUSEUMS OF KENYA / ALAN WALKER



POUR LA SCIENCE

Fossilfundstätten von Australopithecinen und noch älteren Hominiden liegen in Süd- und Ostafrika sowie im Tschad. Die Abbildung zeigt jeweils das Entdeckungsjahr derjenigen Fossilien, anhand derer man die betreffenden Arten beschrieb.

wurde. Diese großwüchsige Menschenform dürfte bereits vor 1,8 bis 2 Millionen Jahren entstanden sein. Eine solche Definition würde die Gattung *Homo* viel klarer fassen als bisher.

Das gleiche Schicksal könnte nach neuen Erkenntnissen die Art *Homo erectus* im weiten Sinne treffen, also die frühen Menschen in Asien und Europa. Einige Anthropologen unterscheiden inzwischen die asiatische Form als *Homo erectus* im strengen Sinne von einem *Homo heidelbergensis*, der in Afrika und dem westlichen Eurasien lebte. Sehr umstritten ist allerdings noch die Bezeichnung *Homo antecessor* für 800 000 Jahre alte nordspanische Fossilien, die vor nicht einmal zehn Jahren auftauchten. Immerhin könnte diese Menschenform am Ursprung von Neandertaler und modernem Menschen stehen.

Früher Aufbruch nach Eurasien

Viele Forscher tendieren heute dazu, den modernen Menschen und den Neandertaler eher als zwei getrennte Formen bis hin zu eigenständigen Arten einzustufen: *Homo neanderthalensis* und *Homo sapiens*. Unter anderem berufen sie sich auf Vergleiche von Erbsequenzen der Mitochondrien, die ihnen in den letzten Jahren an Fossilien gelangen. Diese Sequenzen waren bei den untersuchten Neandertalern deutlich anders als bei heutigen Menschen.

In den 1990er Jahren kam heraus, dass sich Menschen wesentlich eher von Afrika her ausbreiteten als bisher angenommen. Nach Asien wagte sich nicht erst vor einer Million Jahren ein eher kräftig gestalteter *Homo erectus*, der schon mit einem ziemlich großen Gehirn ausgestattet und auch bereits kulturell recht gut gerüstet war. Als Erstes fand sich Anfang der 1990er Jahre in Dmanisi in Georgien – praktisch vor den Toren Europas – ein Unterkiefer, dessen Alter auf über 1,7 Millionen Jahre eingestuft wurde. Mehrere weitere asiatische Funde haben offenbar ein sehr hohes Alter. So wird ein Kieferbruchstück von Longuppo in Mittelchina auf 1,8 Millionen Jahre datiert, ein Fossil von Trinil auf Java auf etwa 1,7 Millionen Jahre. Zudem sprechen auch archäologische Befunde aus Israel, Pakistan und China dafür, dass Menschen Afrika schon vor eineinhalb bis zwei Millionen Jahren Richtung Eurasien verließen. Hieran lässt sich kaum noch zweifeln, seit in Dmanisi in den letzten Jahren drei fast 1,8 Millionen Jahre alte menschliche Schädel auftauchten (siehe Bild Seite 23).

Einer der Dmanisi-Schädel weist eine Hirnkapazität von nur etwa 600 Kubikzentimetern auf. Darin gleicht er einem *Homo habilis*, doch anatomisch ähnelt er wie die anderen Schädel in vielem *Homo ergaster*, jener schon weiter entwickelten afrikanischen Form. Das Merkmalsmosaik würde hervorragend zu einer Zwischenform dieser beiden Arten passen, wie übrigens auch einige oft vergessene afrikanische, besonders südafrikanische Fossilien. Aus all dem folgt: Vor etwa 1,8 Millionen Jahren machten sich bereits eher kleine, kleinhirnige Menschen nach Eurasien auf, die noch sehr einfache Werkzeuge – behauene Geröllsteine – besaßen.

Was also haben die letzten drei Jahrzehnte Neues über die Menschenevolution herausgebracht? Unser schöner Stammbaum ist gefällt. Stattdessen steht nun ein Busch. Ob er östlich oder westlich des afrikanischen Grabenbruchs wurzelt, ist offen. Falls der Busch östlich davon keimte, könnte *Orrorin tugenensis* mit seinem aufrechten Gang unser Vorfahr sein. Begann sein Wachstum weiter westlich, könnten Gesicht und Gebiss von *Sahelanthropus tchadensis* von sehr frühen Vorfahren des Menschen zeugen.

Eines ist allerdings sicher: Die Wurzeln der Menschen sind in Afrika zu suchen. Das hatte Charles Darwin schon 1872 vermutet. Anthropologen brauchten aber über hundert Jahre, um dies zu bestätigen. Bei all dem sollten wir stets daran denken, dass die Fossilien für das Ziel, die Evolution des Menschen zu erforschen, zwar den spektakulärsten Teil ausmachen. Doch eigentlich ist dieses Unterfangen ein Abenteuer der Denkansätze. Das letztlich Entscheidende sind die wissenschaftlichen Konzepte, die sich ausbilden müssen. Noch zweihundert Jahre nach Georges Cuvier mit seiner Katastrophentheorie ist die Vorstellung von einer einlinigen Weiterentwicklung nicht wirklich aus den Köpfen verschwunden. Kaum taucht ein neues Fossil auf, verlautet immer noch, dies sei »der älteste menschliche Vorfahr«, obwohl es mit größerer Wahrscheinlichkeit eine weitere von vielen frühen Linien im Hominidenbusch repräsentiert.

In den letzten drei Jahrzehnten hat sich die Artenzahl fossiler Hominiden vervierfacht. Viele Forscher rechnen nun auch die Schimpansen zur Hominiden-Familie. Sie haben begriffen, welch großen Einfluss Umweltveränderungen auf die menschliche Evolution hatten. Sie erkannten, dass diese Evolution letztlich auch auf Zufällen beruhte. Und sie berücksichtigen, dass stets mehrere aufrecht gehende Hominidenarten gleichzeitig lebten. Nicht länger sind Archäologen und Anthropologen versucht, eine Kulturstufe mit einem Menschentyp gleichzusetzen. Zu den wichtigsten Erkenntnissen gehört auch die Einsicht, dass sich Merkmale wie der aufrechte Gang, die Werkzeugherstellung und das große Gehirn nicht gemeinsam entwickelten.

Diese neuen Auffassungen vertreten die Paläoanthropologen noch längst nicht einhellig. Das eigentliche Problem dieser Forschungsrichtung scheint zu sein, dass sich jeder gern sein eigenes Bild vom Menschen macht. ◁

UNIVERSITÄT TÜBINGEN, ÄLTERE URGESCHICHTE

Bereits vor über 30 000 Jahren schufen Europäer eindrucksvolle Kunst. Diese 33 000 Jahre alte Mammutskulptur stammt aus der Vogelherdhöhle bei Ulm.

Pascal Picq ist Paläontologe. Er arbeitet am Collège de France in Paris am Institut für Paläoanthropologie und Vorgeschichte .

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Literaturhinweise

Vom Affen zum Menschen. Teil 1: Evolution der Primaten; Teil 2: Evolution des Menschen. Von Louis de Bonis. Spektrum der Wissenschaft, Compact 1/2001 und 1/2002.

Die Evolution des Menschen. Spektrum der Wissenschaft, Dossier 3/2000.

Weblinks zum Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Wenn Sterne zusammenprallen

Das Feuerwerk, das die Kollision zweier Sterne entfacht, könnte ein hübscher Anblick sein – solange man sich nicht allzu nahe befände. Entgegen bisheriger Auffassung sind solche kosmischen Verkehrsunfälle in bestimmten Regionen unseres Milchstraßensystems recht häufig.

Von Michael Shara

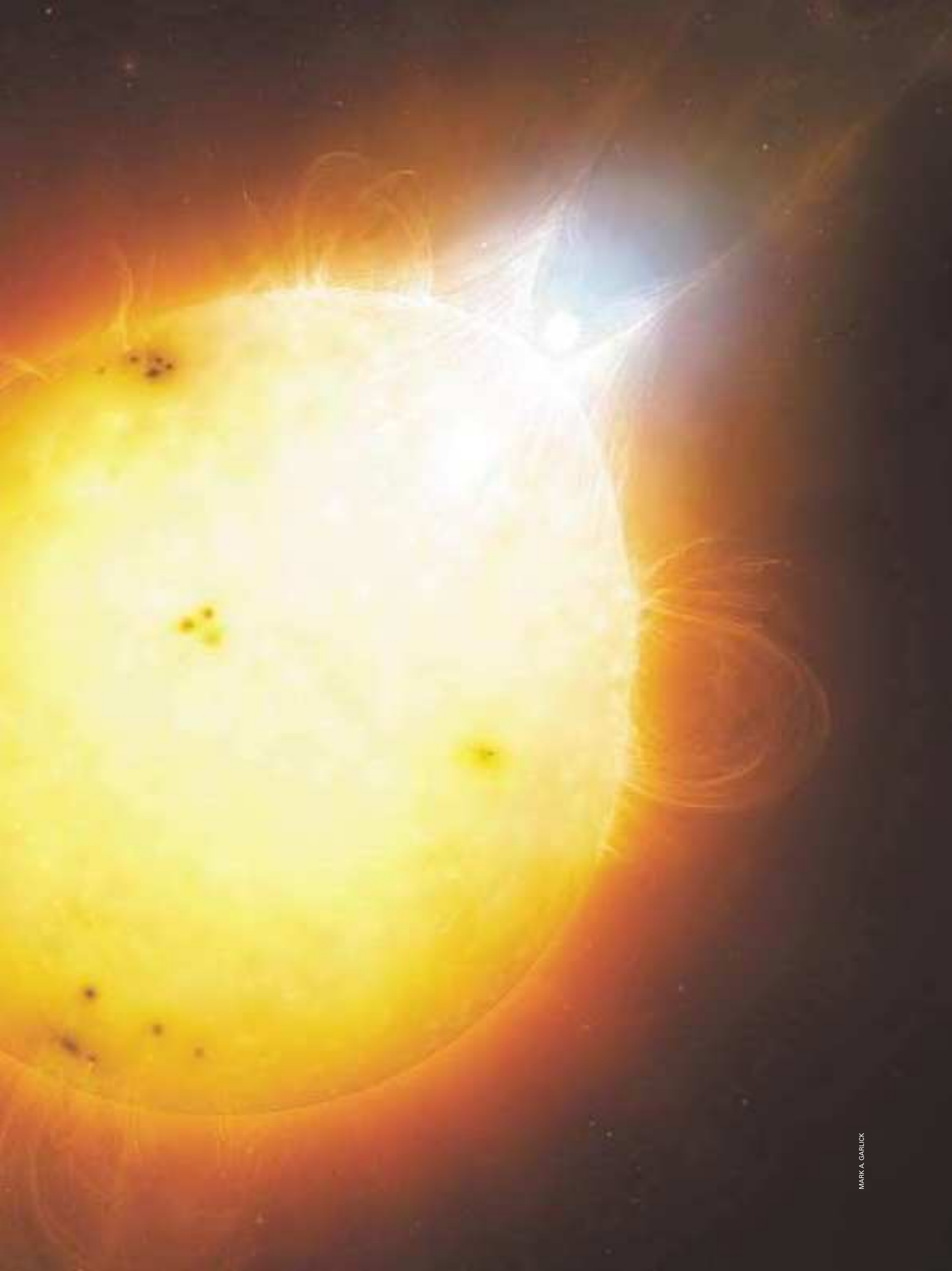
Von allen möglichen Katastrophen, die dem Leben auf der Erde ein Ende setzen könnten, wäre der Zusammenprall der Sonne mit einem anderen Stern wohl die dramatischste. Falls das heranrasende Projektil ein Weißer Zwerg wäre – ein überdichter Stern mit der Masse der Sonne, aber nur mit einem Hundertstel ihres Durchmessers – würde die Menschheit ein gewaltiges Feuerwerk erleben. Der Weiße Zwerg würde mit über 600 Kilometern pro Sekunde in unser Tagesgestirn eindringen und dabei eine heftige Stoßwelle erzeugen, welche die gesamte Sonne zusammendrücken und so weit aufheizen würde, dass auch außerhalb ihres Kerns Fusionsreaktionen zündeten.

Nur eine Stunde würde der Weiße Zwerg benötigen, um die Sonne komplett zu durchschlagen – und dabei irreversiblen Schaden anzurichten. Die überhitzte Sonne würde in dieser Zeit so viel Energie freisetzen wie sonst in 100 Millionen Jahren. Durch den aufgebauten Druck würde Gas so schnell herausspritzen, dass es das Sonnensystem verlassen könnte. Innerhalb einer einzigen Stunde wäre die Sonne zerrissen. Der Verursacher dieser Katastrophe, der Weiße Zwerg, würde unterdessen fast unbeschadet seinen Weg fortsetzen – freilich, wir wären nicht mehr da, um uns über diese Unfallflucht aufzuregen.

Bis vor kurzem hielten die Astronomen es geradezu für lächerlich, stellare Kollisionen zu untersuchen. Denn die Abstände der Sterne in der Sonnenumgebung sind einfach zu groß, als dass es je zu Zusammenstößen kommen könnte. Andere Kalamitäten werden in ferner Zukunft über die Sonne (und die Erde) hereinbrechen, aber die Kollision mit einem anderen Stern ist extrem unwahrscheinlich. Am Anfang des 20. Jahrhunderts führte der britische Astronom James Jeans eine einfache Berechnung durch, die vermuten ließ, dass nicht ein einziger der 100 Milliarden Sterne der Galaxis jemals mit einem anderen Stern zusammengestoßen ist.

Aber das bedeutet nicht, dass Kollisionen wirklich ausgeschlossen sind. Die Annahmen – und damit auch das Ergebnis – von Jeans' Berechnungen gelten für die ▷

Einen solchen Anblick sollten wir uns nicht wünschen. Denn wenn ein Weißer Zwerg auf die Sonne träfe (rechts oben), würde er – trotz seiner geringen Größe – eine katastrophale Serie von Ereignissen auslösen. Schon während seiner Annäherung würde der Weiße Zwerg Materie der Sonne ansaugen und diese birnenförmig verzerren. Glücklicherweise ist eine solche Kollision extrem unwahrscheinlich. Aber in dichteren Regionen unseres Milchstraßensystems, zum Beispiel in Kugelsternhaufen, geschieht so etwas recht häufig.



MARK A. GARLICK

Umgebung der Sonne, aber nicht für andere, exotische Gegenden des Milchstraßensystems. Dichte Sternhaufen zum Beispiel stellen besonders unfallträchtige Regionen dar. In diesen Anhäufungen von Sternen haben die Beobachter Objekte aufgespürt, deren Existenz nach den Regeln der gewöhnlichen Sternentwicklung verboten wäre. Aber diese Himmelskörper lassen sich als Folgeprodukt stellarer Kollisionen erklären. Zusammenstöße können deshalb die langfristige Entwicklung ganzer Sternhaufen verändern – und die gewaltigsten Kollisionen lassen sich quer durch das halbe Universum hindurch verfolgen.

Die Entdeckung der Quasare im Jahre 1963 brachte einige skeptische Astronomen auf die Idee, stellare Kollisionen ernst zu nehmen. Viele Quasare strahlen so viel Energie ab wie 100 Billionen Sonnen. Da ihre Helligkeit innerhalb eines Tages stark fluktuieren kann, muss ihre Energie erzeugende Region kleiner sein als die Strecke, die das Licht an einem Tag zurücklegt – also etwa so groß wie das Sonnensystem. Wenn man Millionen von Sternen in einem solch kleinen Volumen konzentriert, so fragten sich die Astronomen, würde es dann zu Zusammenstößen kommen? Und könnten diese Kollisionen die gewaltigen Energien der Quasare freisetzen?

Um das Jahr 1970 wurde jedoch klar, dass die Antwort auf die zweite Frage »Nein« lautet. Zudem können stellare Kollisionen nicht die dünnen Materiestrahlen erklären, die so genannten Jets, die aus dem Zentrum der Quasare herausschießen. Die einleuchtendste Erklärung lieferten schließlich extrem massereiche Schwarze Löcher. Allerdings haben kürzlich einige Forscher vorgeschlagen, dass Sternkollisionen dazu beitragen könnten, diese Schwarzen Löcher mit Materie zu füttern.

Während die Fachleute für extragalaktische Systeme also die Idee der stellaren Zusammenstöße aufgaben, stürzten sich jene Kollegen, die Vorgänge innerhalb der Galaxis untersuchen, geradezu darauf. Der Satellit Uhuru, 1970 mit der Aufgabe gestartet, den Himmel nach Röntgenquellen abzusuchen, hatte über hundert helle Quellen im Milchstraßensystem entdeckt. Zehn Prozent dieser neuen Objekte fanden sich in den dichtesten Sternenansammlungen, den Kugelsternhaufen. Solche Haufen enthalten aber nur 0,01 Prozent der Sterne des Milchstraßensystems. Aus irgendeinem Grund enthalten Kugelsternhaufen also einen überproportional hohen Anteil an Röntgenquellen.

Eine Welt, in der Sterne Sterne fressen

Um das Rätsel von einer anderen Seite aus zu betrachten, fragen wir, welcher Prozess denn eigentlich die Röntgenstrahlung produziert. Die Astronomen vermuten, dass es sich bei den Röntgenquellen um Paare von Sternen handelt, von denen einer bereits sein normales Dasein beendet hat und zu einem Neutronenstern oder Schwarzen Loch kollabiert ist. Dieser ehemalige Stern »ernährt« sich nun kannibalisch von seinem Partner und heizt dabei das Gas so stark auf, dass es Röntgenstrahlung aussendet. Derart morbide Sternenpaarungen sind jedoch selten. Die gleichzeitige Entwicklung zweier neugeborener Sterne in einem Doppelsystem erzeugt nur in einem von einer Milliarde Fälle eine intensiv strahlende Röntgenquelle.

Wie wird in den Kugelsternhaufen diese Unwahrscheinlichkeit überwunden? Es dämmerte den Astronomen, dass die hohe Sternendichte der entscheidende Faktor ist. Eine Million Sterne sind in den Kugelsternhaufen in ein Volumen gestopft, das nur wenige Dutzend Lichtjahre Durchmesser hat – ein ähnliches Volumen in der Umgebung der Sonne enthielte gerade einmal hundert Sterne. Wie in einem Bienenschwarm bewegen sich die Sterne auf ständig wechselnden Bahnen. Solche mit niedriger Masse können aus dem Haufen hinausgeschleudert werden, wenn sie nahe an massereicheren Einzel- oder Doppelsternen vorüberziehen und dabei Energie aufnehmen. Dieser Prozess wird als »Verdampfung« bezeichnet, da er dem Entweichen von Molekülen aus einer erhitzten Flüssigkeit ähnelt. Die zurückbleibenden Sterne, die Energie verloren haben, konzentrieren sich noch enger zum Zentrum des Haufens hin. Im Laufe der Zeit werden die dicht gepackten Sterne anfangen, miteinander zu kollidieren.

Freilich ist sogar in einem Kugelsternhaufen der Abstand zwischen den Sternen weitaus größer als ihr Durchmesser. Aber im Jahr 1975 zeigten Jack G. Hills und Carol A. Day, damals an der Universität von Michigan in Ann Arbor, dass die Wahrscheinlichkeit für einen Zusammenstoß nicht einfach vom geometrischen Wirkungsquerschnitt eines Sterns abhängt. Weil sich die Sterne in einem Kugelhaufen – nach kosmischen Maßstäben – im Schneckentempo bewegen, nämlich mit zehn bis zwanzig Kilometern pro Sekunde, hat die Schwerkraft eine Menge Zeit, um während naher Vorübergänge auf die Sterne einzuwirken. Ohne Schwerkraft könnten zwei Sterne nur miteinander kollidieren, wenn sie sich direkt aufeinander zu bewegen. Die zwischen beiden wirkende Schwereanziehung verbiegt jedoch ihre Bahnen. Sind die Sterne gewissermaßen zunächst rein ballistische Flugkörper, so liefert die Schwerkraft das Lenksystem zum Anpeilen des Ziels. Ein Zusammenstoß wird dadurch hundertmal wahrscheinlicher. Tatsächlich hat vermutlich etwa die Hälfte aller Sterne in der Zentralregion eines Kugelsternhaufens in den letzten 13 Milliarden Jahren mindestens eine Kollision erlebt.

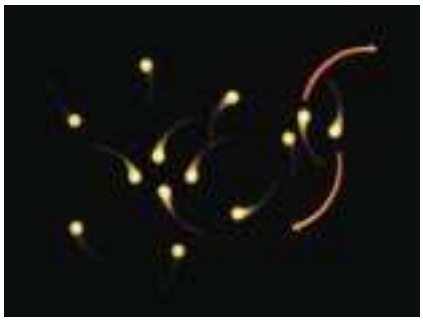
Ebenfalls etwa Mitte der 1970er Jahre schlugen Andrew C. Fabian, James E. Pringle und Martin J. Rees von der Universität Cambridge vor, streifende Kollisionen und sehr enge Vorübergänge könnten aus zwei Einzelsternen ein Doppelsystem werden lassen. Eigentlich sind nahe Vorübergänge von Sternen symmetrisch: Sie nähern sich einander an, beschleunigen, schwingen sich aneinander vorbei und fliegen mit abnehmender Geschwindigkeit wieder auseinander. Wenn jedoch einer der beiden ein Neutronenstern oder ein Schwarzes Loch ist, dann kann dessen Schwerkraft den anderen Stern deformieren, wodurch ein Teil

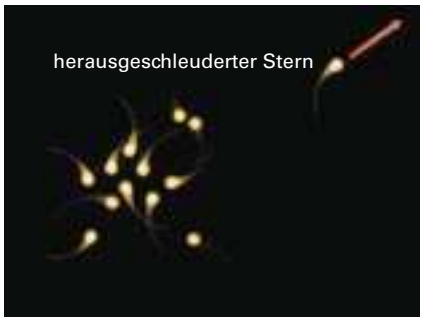
IN KÜRZE

- Die konventionelle Ansicht, Sterne würden niemals zusammenstoßen, ist falsch. **Kollisionen** können in Sternhaufen vorkommen, insbesondere in **Kugelsternhaufen**, wo die Sterndichte groß ist und die gravitativen Wechselwirkungen die Chancen für Zusammenstöße erhöhen.
- Es gibt zwei wichtige Indizien für das tatsächliche Auftreten von Kollisionen. Erstens enthalten Kugelsternhaufen so genannte **Blaue Vagabunden**, die sich am ehesten als Kollisionsprodukte erklären lassen. Zweitens enthalten Kugelsternhaufen eine ungewöhnlich hohe Anzahl von **Röntgenquellen** – ebenfalls am ehesten als Produkt von Sternkollisionen zu erklären.

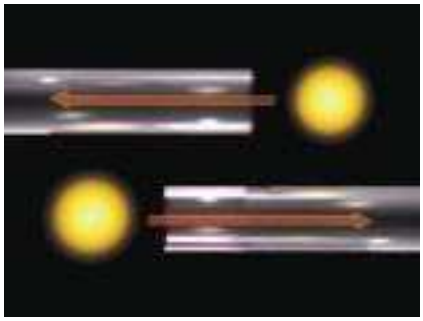
Risikofaktoren für Sternkollisionen

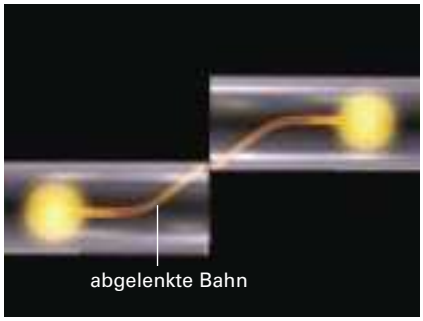
VERDAMPFUNG
In einem Kugelsternhaufen schwirren die Sterne umher wie Bienen in einem Schwarm. Enge Begegnungen zwischen ihnen verteilen die Energie um und können dazu führen, dass einzelne Sterne aus dem Haufen herausgeschleudert werden, während die zurückgebliebenen enger zusammenrücken und dadurch ein höheres Kollisionsrisiko haben.



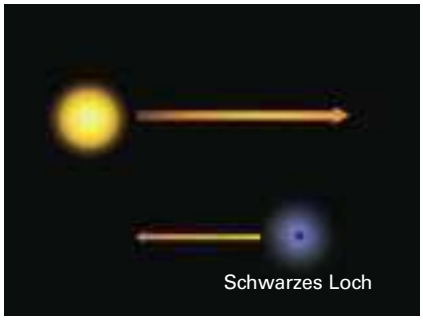


GRAVITATIVE FOKUSSIERUNG
Im kosmischen Maßstab sind Sterne winzige Ziele. Jeder Stern überstreicht durch seine Bewegung nur eine sehr kleine Region des Raumes, und auf den ersten Blick scheint es unwahrscheinlich, dass sich zwei solche Regionen schneiden könnten. Doch die Gravitation erhöht den Wirkungsquerschnitt für eine Kollision, indem sie die Bahn sich nähernder Objekte krümmt. Mit seiner Schwerkraft füllt ein Stern also eine deutlich größere Raumregion aus und erhöht so die Trefferwahrscheinlichkeit beträchtlich.





GEZEITEN-EINFANG
Ein Schwarzes Loch ist ein noch kleineres Ziel als ein normaler Stern. Aber es übt starke Gezeitenkräfte aus, die einen vorbeiziehenden Stern deformieren. Diese Deformierung nimmt einen Teil der Bahnenergie des Sterns auf, sodass dieser in eine Umlaufbahn um das Schwarze Loch gezwungen wird. Eine Kollision zwischen den beiden Himmelskörpern ist dann nur noch eine Frage der Zeit.



ALFRED T. KAMAJIAN

der kinetischen Energie umgewandelt und der Stern am Entweichen gehindert wird. Diesen Vorgang nennen die Astronomen Gezeiten-Einfang. Der Neutronenstern beziehungsweise das Schwarze Loch tut sich dann an dem eingefangenen Stern gütlich und erzeugt so Röntgenstrahlen.

Sind an einem engen Vorübergang nicht zwei, sondern drei Sterne beteiligt, dann ist die Bildung eines Röntgen-Doppelsterns sogar noch wahrscheinlicher. Die Dynamik von drei Körpern ist sehr komplex und manchmal sogar chaotisch. Normalerweise wird die Energie bei einer solchen Begegnung so umverteilt, dass die beiden massereicheren Sterne ein neues Paar bilden und der dritte Stern wieder herauskatapultiert wird. Die typische Situation wäre die Begegnung zwischen einem einsamen Neutronenstern und einem gewöhnlichen Doppelstern. Kommt der Neutronenstern dem Pärchen zu nahe, so tauscht er die Rolle mit einem der normalen Sterne – ein Röntgen-Doppelstern ist entstanden, der verdrängte normale Stern fliegt als Einzelgänger davon.

Ein Crash-Szenario

Insgesamt führen Drei-Körper-Begegnungen und Gezeiten-Einfang dazu, dass die Entstehungsrate von Röntgenquellen in Kugelsternhaufen tausendmal höher ist als gewöhnlich. Damit ist also das von Uhuru gelieferte Rätsel gelöst.

Was passiert nun, wenn zwei Sterne aufeinanderprallen? Wie beim Zusammenstoß zweier Fahrzeuge hängt das Ergebnis von mehreren Faktoren ab: der Geschwindigkeit der beiden kollidierenden Objekte, ihrem Aufbau und dem Impakt-Parameter. Letzterer beschreibt, ob der Zusammenstoß streifend ist oder frontal. Bei einigen Zusammenstößen werden lediglich die Stoßstangen verbogen – andere enden an beiden Fahrzeugen mit Totalschaden. Eine frontale Kollision mit hoher Geschwindigkeit würde am effektivsten kinetische Energie in Hitze und Druck verwandeln.

Obwohl die Astronomen auf Supercomputer angewiesen sind, um den Zusammenprall von Sternen in allen Einzelheiten zu simulieren, sind die Grundprinzipien recht einfach. Am wichtigsten ist dabei der Dichte-Unterschied. Ein Stern ▷

Was aus den Stoßpartnern wird

Es gibt sieben grundlegende Arten von Sternen. Schwarze Löcher weisen dabei die höchste Dichte auf, Rote Riesen die geringste. Unsere Sonne ist ein Hauptreihenstern. Diese Tabelle führt das Ergebnis von 28 unterschiedlichen »Paarungen« von Sternen auf. In vielen Fällen hängt das Ergebnis einer Kollision von Geschwindigkeit und Einschlagwinkel oder anderen Parametern ab. Die hier aufgeführten Ergebnisse gehen von tief eindringenden Kollisionen mit moderater Geschwindigkeit aus. Zwei derartige Kollisionen (farbig hervorgehoben) sind rechts in den Bildsequenzen dargestellt.

	Überriese	Roter Riese	Hauptreihen-stern	Brauner Zwerg	Weißer Zwerg	Neutronen-stern	Schwarzes Loch
Schwarzes Loch	Schwarzes Loch + Scheibe + Weißer Zwerg	Schwarzes Loch + Scheibe + Weißer Zwerg	Schwarzes Loch + Scheibe	Schwarzes Loch + Scheibe	Schwarzes Loch + Scheibe	Schwarzes Loch + Scheibe	Schwarzes Loch
Neutronen-stern	Neutronenstern oder Schwarzes Loch + Scheibe + Weißer Zwerg	Neutronenstern oder Schwarzes Loch + Scheibe + Weißer Zwerg	Neutronenstern oder Schwarzes Loch + Scheibe	Neutronenstern oder Schwarzes Loch + Scheibe	Neutronenstern oder Schwarzes Loch + Scheibe	Neutronenstern oder Schwarzes Loch + Scheibe	
Weißer Zwerg	Weißer Zwerg + Weißer Zwerg	Weißer Zwerg + Weißer Zwerg	Weißer Zwerg	Weißer Zwerg oder Neutronenstern	Neutronenstern oder Weißer Zwerg		
Brauner Zwerg	Brauner Zwerg + Weißer Zwerg	Brauner Zwerg + Weißer Zwerg	Hauptreihen-stern	Hauptreihenstern oder Brauner Zwerg			
Haupt-reihen-stern	Hauptreihenstern + Weißer Zwerg	Hauptreihenstern + Weißer Zwerg	Hauptreihen-stern				
Roter Riese	Weißer Zwerg + Weißer Zwerg	Weißer Zwerg + Weißer Zwerg					
Überriese	Weißer Zwerg + Weißer Zwerg						

▷ hoher Dichte nimmt bei einer Kollision weit weniger Schaden als ein Stern geringer Dichte – so wie eine Pistolenkugel keinen Kratzer erleidet, wenn sie eine Wassermelone zerfetzt. Gemeinsam mit meinen Kollegen Giora Shaviv und Oded Regev, damals an der Universität Tel Aviv und heute am Technion-Israel Institut für Technologie in Haifa tätig, habe ich in den 1970er und 1980er Jahren erstmalig den Frontalzusammenstoß zwischen einem sonnenähnlichen Stern und einem erheblich dichteren Stern, einem Weißen Zwerg, untersucht. Während der sonnenähnliche Stoßpartner völlig zerstört wird, kommt der Weiße Zwerg, der rund zehn Millionen Mal dichter ist, mit einer geringfügigen Erwärmung seiner Außenschichten davon. Abgesehen von einer ungewöhnlich großen Häufigkeit von Stickstoff an der Oberfläche erscheint der Weiße Zwerg anschließend unverändert.

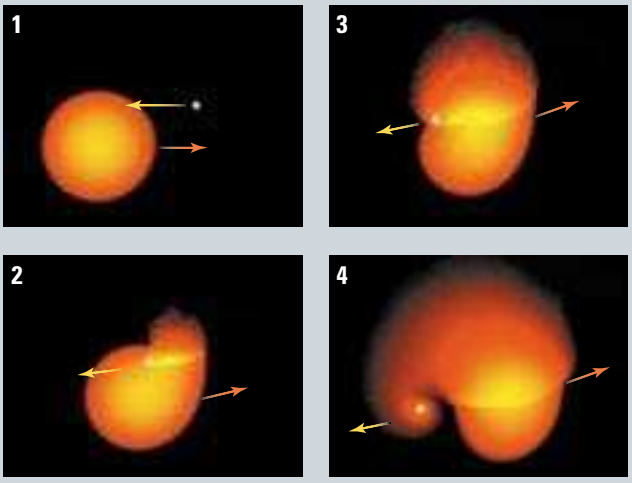
Bei einer streifenden Kollision ist es für den Zwergstern allerdings schwerer, seine Spuren zu verwischen. Einen solchen Zusammenstoß habe ich erstmalig mit Regev, Noam Soker von der Universität Haifa in Oranim und der Universität von Virginia, sowie Mario Livio vom Space Telescope Science Institute in Baltimore simuliert. Die Trümmer des zerstörten sonnenähnlichen Sterns bilden in diesem Fall eine massereiche Scheibe um den Zwergstern. Bislang hat niemand solche Scheiben nachgewiesen, aber die Astronomen könnten sie leicht mit Masse austauschenden Doppelsternen in Sternhaufen verwechseln.

Aus zwei mach eins

Wenn die kollidierenden Sterne vom gleichen Typ sowie von gleicher Dichte und Größe sind, verläuft das Geschehen gänzlich anders. Den Fall zweier sonnenähnlicher Sterne haben erstmalig in den 1970er Jahren Alastair G. W. Cameron, damals an der Universität Yeshiva und jetzt an der Universität von Arizona, und Frederick G. P. Seidl vom Goddard-Institut für Weltraumwissenschaften der Nasa simuliert. Während die zunächst kugelförmigen Sterne sich zunehmend durchdringen, verdichten und deformieren sie sich gegenseitig zu halbmondförmigen Gebilden. Temperatur und Dichte erreichen dabei aber niemals so hohe Werte, dass es zu einer zerstörerischen thermonuklearen Explosion kommen könnte. Während wenige Prozent der Sternmasse senkrecht zur Bewegungsrichtung herausgequetscht werden, vermischt sich der Rest einfach: Innerhalb von einer Stunde ist aus zwei Sternen ein einziger geworden.

Es ist allerdings sehr viel wahrscheinlicher, dass zwei Sterne nicht exakt frontal, sondern etwas versetzt zusammenprallen, und es ist auch sehr viel wahrscheinlicher, dass ihre Masse ein wenig verschieden ist. Diesen allgemeinen Fall haben Willy Benz von der Universität Bern, Frederic A. Rasio von der Northwestern-Universität, James C. Lombardi vom Vassar College und ihre Koautoren in allen Einzelheiten unter-

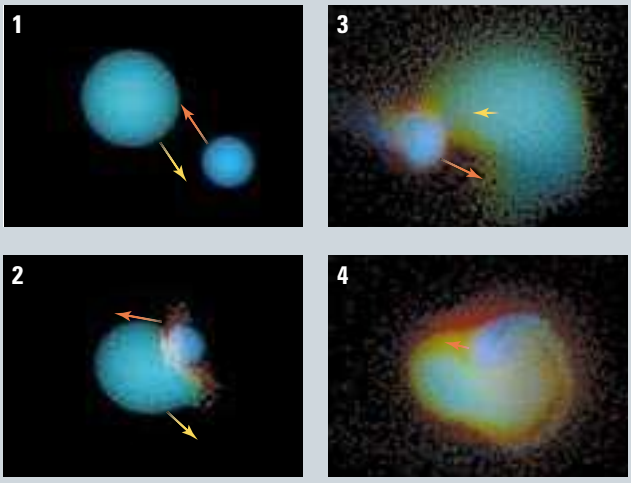
Weißer Zwerg trifft Roten Riesen



MATTHEW BATE / UNIVERSITY OF EXETER

Einen Monat dauert es, bis der Weiße Zwerg den Roten Riesen komplett durchdrungen hat. Er entkommt unverändert und entreißt dem Riesenstern ein Teil seines Gases. Der Rote Riese wird völlig zerstört, sein Kern allerdings sammelt sich wieder und bildet einen weiteren Weißen Zwerg. (Ein vollständiger Film des Vorgangs ist unter www.ukaff.ac.uk/movies/collision.mov zu sehen.)

Hauptreihenstern trifft Hauptreihenstern



JOSHUA BARNES / UNIVERSITY OF HAWAII

Zwei gewöhnliche Sterne mit ungleicher Masse treffen versetzt aufeinander. Der kleinere Stern hat weniger Masse, ist aber dichter, deshalb bleibt er länger unversehrt. Im Verlauf einer Stunde taucht er in den größeren Stoßpartner ein. Ein einzelner, schnell rotierender Stern entsteht. Ein Teil der Masse wird in den Weltraum abgestoßen. (Ein vollständiger Film des Vorgangs ist unter www.sciam.com erhältlich.)

sucht. Bei einer solchen Kollision kommt es zu einem wundervollen Vermählungstanz der beiden Sterne, der in eine Vereinigung der beiden Partner mündet.

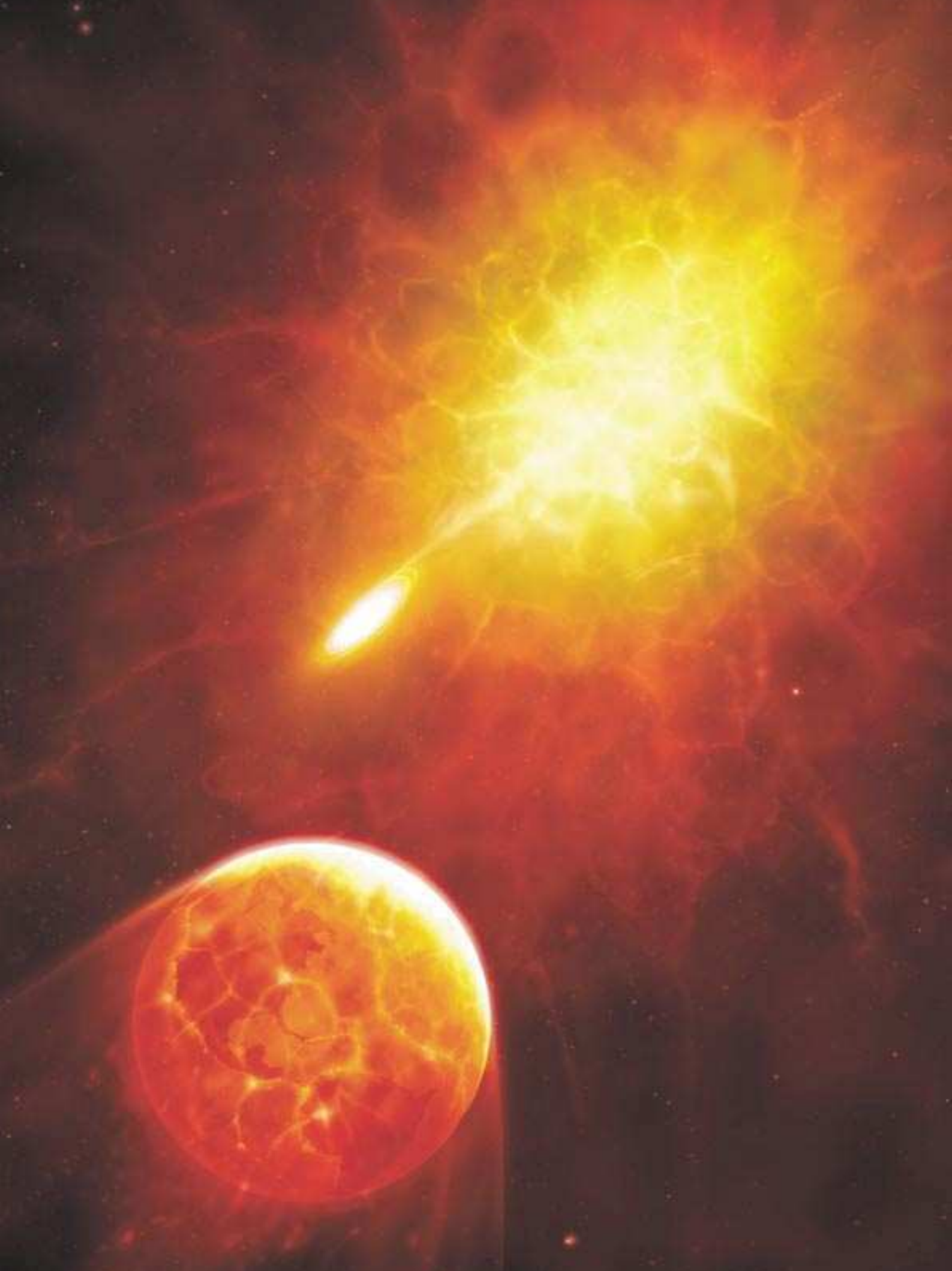
Das entstehende Objekt ist dabei völlig verschieden von einem gewöhnlichen Einzelstern wie unserer Sonne. Ein Einzelstern hat keine Möglichkeit, seinen ursprünglichen Vorrat an Brennstoff wieder aufzufüllen. Seine Lebensspanne ist deshalb vorherbestimmt. Je massereicher der Stern ist, desto heißer ist er und desto schneller verbrennt er seinen Vorrat. Aus der Farbe eines Sterns, die ein Maß für seine Temperatur ist, können Computermodelle die Lebensdauer eines Sterns mit hoher Genauigkeit vorhersagen. Aber ein verschmolzener Stern folgt anderen Regeln. Die Vermischung der Gasschichten während der Kollision kann frischen Wasserstoff in den Kern des Sterns bringen – und damit als Jungbrunnen wirken. Es ist, als würfe man trockene Zweige in ein heruntergebranntes Lagerfeuer. Da der entstehende Stern massereicher ist als seine Vorgänger, ist er auch heißer, blauer und heller. Wenn ein Beobachter aus seiner Farbe und seiner Leuchtkraft auf sein Alter zu schließen sucht, wird er sich also gehörig verschätzen.

Die Sonne hat zum Beispiel eine Lebensspanne von zehn Milliarden Jahren. Ein Stern mit der doppelten Masse hingegen leuchtet zehnmal heller, dafür aber nur 800 Millionen Jahre. Wenn also zwei sonnenähnliche Sterne in der Mitte ihres Daseins miteinander verschmelzen, entsteht ein heißer Stern, der bereits fünf Milliarden Jahre alt ist, aber aussieht, als müsste er jünger als 800 Millionen Jahre sein. Die noch verbleibende Lebenszeit für den verschmolzenen Stern hängt davon ab, wieviel Wasserstoff während der Kollision in sein Zentrum eingedrungen ist. Im Allgemeinen wird sie geringer sein als die Lebenserwartung der ursprünglichen Sterne. Und selbst in seinem Tod unterscheidet sich ein verschmolzener von einem gewöhnlichen Stern. Wenn ein solcher Stern stirbt – in dem er sich zu einem Roten Riesen aufbläht, einen Planetarischen Nebel erzeugt und zu einem Weißen Zwerg wird –, ist er erheblich heißer als andere, ältere Weiße Zwerge mit vergleichbarer Masse.

Blaue Vagabunden

Verschmolzene Sterne sollten in einem Kugelsternhaufen sofort auffallen. Denn alle Mitglieder eines solchen Haufens sind ungefähr zur selben Zeit entstanden – ihre Zustandsgrößen Temperatur und Helligkeit entwickeln sich sozusagen im Gleichschritt. Ein verschmolzener Stern jedoch wäre aus dem Tritt geraten. Er erschiene außergewöhnlich jung; andere Sterne vergleichbarer Helligkeit und Farbe wären längst vergangen. Die Anwesenheit solcher Sterne in den Kernbereichen von Kugelsternhaufen ist eine der wichtigsten Vorhersagen der Theorie der Stern-Kollisionen.

Tatsächlich entdeckte Allan R. Sandage von der Carnegie-Institution in Wa- ▷



▷ shington in den frühen 1950er Jahren ungewöhnlich heiße und blaue Sterne in Kugelsternhaufen, so genannte Blaue Vagabunden oder Blaue Nachzügler (englisch: *blue stragglers*). Seither haben sich die Wissenschaftler ein gutes Dutzend Theorien über den Ursprung dieser Himmelskörper ausgedacht. Erst im vergangenen Jahrzehnt konnte das Hubble-Weltraumteleskop gewichtige Indizien dafür liefern, dass die Blauen Vagabunden etwas mit Sternkollisionen zu tun haben.

Im Jahr 1991 fanden Francesco Paresce, George Meylan und ich, damals alle am Space Telescope Science Institute in Baltimore, dass das Zentrum des Kugelsternhaufens 47 Tucanae dicht mit Blauen Vagabunden vollgepackt ist – genau da also, wo die Theorie eine große Zahl verschmolzener Sterne vorhersagt. Sechs Jahre später konnten David Zurek vom Space Telescope Science Institute, Rex A. Saffer von der Villanova-Universität und ich erstmalig die Masse eines Blauen Vagabunden bestimmen. Er weist ungefähr die doppelte Masse auf wie die massereichsten normalen Sterne des Haufens – genau wie erwartet, wenn es sich um einen verschmolzenen Stern handelt. Saffer und seine Kollegen haben einen anderen Blauen Vagabunden gefunden, der dreimal so viel Masse besitzt wie gewöhnliche Sterne in seinem Haufen. Den Astronomen ist bislang keine andere Möglichkeit eingefallen, solche schweren Objekte in diesen Umgebungen herzustellen, als Sternkollisionen.

Gegenwärtig sind wir dabei, die Massen und die Rotation von Dutzenden von Blauen Vagabunden zu bestimmen. Währenddessen halten Beobachter Ausschau nach den anderen vorhergesagten Effekten der Zusammenstöße. So haben zum Beispiel S. George Djorgovski vom California Institute of Technology in Pasadena und seine Mitautoren herausgefunden, dass es im Kernbereich von Kugelsternhaufen erheblich weniger Rote Riesen gibt als erwartet. Rote Riesen haben Wirkungsquerschnitte, die viele tausendmal größer sind als bei sonnenähnlichen Sternen, sodass sie ungewöhnlich große Ziele darstellen. Ihre geringe Zahl lässt sich also durch Kollisionen erklären, bei denen sie ihre äußeren Schichten verloren haben und dabei in Sterne einer anderen Art umgewandelt wurden.

Einsame Planetenwaisen

Freilich, all dies sind nur indirekte Indizien. Ein eindeutiger Beweis für Sternkollisionen ist schwerer zu finden. Die mittlere Zeit zwischen zwei Kollisionen in den 150 Kugelsternhaufen des Milchstraßensystems beträgt rund 10 000 Jahre – im Rest der Galaxis sind es Milliarden von Jahren. Nur wenn wir extremes Glück hätten, würde eine Kollision so nahe bei uns stattfinden – nicht weiter als wenige Millionen Lichtjahre entfernt –, dass die Astronomen den Vorgang mit den heutigen technischen Mitteln beobachten könnten. Der erste direkte Nachweis einer Sternkollision könnte von den Gravitationswellen-Detektoren kommen, die gerade in Betrieb gehen. Die nahe Begegnung von zwei stellaren Massen sollte nämlich das Raumzeit-Kontinuum stören. Das Signal wäre besonders stark im Falle kollidierender Schwarzer Löcher oder Neutronensterne. Derartige Ereignisse gelten auch als eine mögliche Erklärung für die enorm energiereichen Gammastrahlungs-Ausbrüche.

Zusammenstöße von Sternen sind, so zeigt sich, für das Verständnis von Kugelsternhaufen und anderer Himmelsobjekte wichtig. Computer-Simulationen deuten darauf hin, dass die Entwicklung der Haufen stark von eng gebundenen Doppelsternen bestimmt wird, die Energie und Drehimpuls mit dem gesamten Haufen austauschen. Haufen können sich sogar komplett auflösen, wenn durch Beinahe-Kollisionen ein Stern nach dem anderen aus dem Haufen herausgeschleudert wird. Piet Hut vom Institute for Advanced Study in Princeton (New Jersey) ist der Meinung, Dynamik und Entwicklung der Sterne würden sich gegenseitig mittels subtiler Rückkopplungseffekte beeinflussen.

Neuerdings wird auch untersucht, was mit eventuell vorhandenen Planeten bei einer nahen Begegnung von Sternen geschieht. Ihnen ergeht es im Allgemeinen schlecht, wie numerische Simulationen von Jarrod R. Hurley vom American Museum of Natural History in New York zeigen: Sie werden von ihrem Stern oder einem ihrer Planeten-Geschwister verschlungen, sie werden auf eine einsame Reise durch den Sternhaufen geschickt oder gar ganz aus diesem Haufen herausgeschleudert, dazu verdammt, auf ewig allein durch den interstellaren Raum zu ziehen. Jüngste Beobachtungen mit dem Hubble-Weltraumteleskop, die Ron Gilliland vom Space Telescope Science Institute und mehrere Kollegen durchführten, zeigten, dass Sterne in Kugelsternhaufen tatsächlich keine jupitergroßen Planeten zu besitzen scheinen. Allerdings ist der Grund dafür bislang nicht bekannt.

Trotz aller offener Fragen: Der Fortschritt auf diesem Forschungsgebiet ist erstaunlich. Vor nicht allzu langer Zeit noch war allein die Idee von Sternkollisionen absurd. Hinter der scheinbaren Ruhe des Nachthimmels versteckt sich aber offenbar ein Universum von geradezu unvorstellbarer Zerstörungskraft, in dem in jeder Stunde Tausende von Sternpaaren zusammenprallen. Neue Techniken könnten uns schon bald erlauben, diese Ereignisse direkt und routinemäßig zu beobachten. Wir werden dabei zuschauen, wie einige Sterne gewaltsam sterben – und andere wie Phönix aus der Asche neu geboren werden. ◁

◀ **Nach der Kollision der Sonne mit einem Weißen Zwerg würde sie wie eine gigantische thermonukleare Bombe explodieren. Zurück bliebe nur ein Gasnebel. Wenige Prozent der Sonnenmasse sammelten sich als Scheibe um den Weißen Zwerg, der unverändert weiterflöge. Die Erde (links unten) überstünde zwar die Katastrophe, doch Atmosphäre und Ozeane verkochten. Nicht länger durch die Schwerkraft eines Zentralgestirns auf ihrer Bahn gehalten, flögen die Planeten in den interstellaren Raum davon und zögen leblos ihre Bahn durch die Galaxis.**

MARK A. GARLICK

Michael Shara ist Kurator und Vorsitzender der Abteilung für Astrophysik am American Museum of Natural History in New York City. Zuvor war er 17 Jahre am Space Telescope Science Institute in Baltimore tätig, wo er für die Gutachter-Komitees für das Hubble-Weltraumteleskop zuständig war. Sharas Forschungsinteressen liegen in den Bereichen Sternkollisionen, Novae und Supernovae sowie Sternpopulationen von Sternhaufen und Galaxien.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Literaturhinweise

The Promiscuous Nature of Stars in Clusters. Von Jarrod R. Hurley und Michael Shara in: Astrophysical Journal, Bd. 570, Heft 1, Teil 1, S. 184 (1. Mai 2002).

Star Cluster Ecology III: Runaway Collisions in Young Compact Star Clusters. Von Simon Portegies Zwart et al. in: Astronomy and Astrophysics, Bd. 348, Heft 1, S. 117 (1999).

The First Direct Measurement of the Mass of a Blue Straggler in the Core of a Globular Cluster: BSS 19 in 47 Tucanae. Von Michael Shara, Rex A. Saffer und Mario Livio in: Astrophysical Journal Letters, Bd. 489, Heft 1, Teil 2, S. L59 (1997).

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

MEDIZINTECHNIK

Herz-Operation durchs Schlüsselloch

Präziser als jede menschliche Hand flicken bleistiftgroße Roboterarme das Loch am Herzen. Der operierende Arzt berührt den Patienten überhaupt nicht, sondern verfolgt das Geschehen durch ein Okular und steuert die mechanischen Handlanger per Joystick. Sciencefiction? Keineswegs! Schon 15 Patienten mit einem Loch in der Scheidewand des Herzvorhofs hat das Team um Michael Argenziano und Mehmet Oz von der Columbia-Universität in New York erfolgreich mit dem Operationsroboter Da Vinci™ System operiert. Durch nur vier fingerdicke Löcher werden die Roboterarme und die Minikamera zwischen den Rippen hindurch in das Herz des Patienten eingeführt – das Öffnen der Brust durch Aufschneiden der Rippen entfällt. Die Kunsthände imitieren die Handbewegungen des Operateurs am Kontrollhebel, führen sie aber dank der Berechnung des integrierten Computers präziser und ohne das geringste Zittern aus. Nur drei Tage mussten die Patienten durchschnittlich im Krankenhaus bleiben – halb so lange wie bei der traditionellen Operationsmethode. Auch ihren Alltag konnten sie doppelt so schnell wie üblich wieder aufnehmen. Einen Nachteil hat die neue Schlüssellochtechnik allerdings noch: Die Operation dauert bis zu doppelt so lang und – ein weiterer Wermutstropfen – sie ist wesentlich teurer. (*American Heart Association Meeting, 19.11.2002*)

BEIDE ABBILDUNGEN: INTUITIVE SURGICAL

▲ Vier zwischen den Rippen eingeführte Roboterarme mit Glasfaseroptik erlauben schonende Operationen am Herzen per Fernsteuerung.

ARCHÄOLOGIE

Altsyrische Königsgruft

In Stein gehauene königliche Grabkammern, sieben Meter tief unter dem Palast der Herrscher von Qatna: Mit diesem sensationellen Fund bringt das Team um Peter Pfälzner von der Universität Tübingen erstmals Licht in die Bestattungsweise syrischer Könige aus der Bronzezeit. Die versunkene Stadt Qatna, rund 200 Kilometer nördlich von Damaskus gelegen, erstreckt sich über einen Quadratkilometer und ist noch heute von 20 Meter hohen Festungswällen umgeben. Erst jüngst wurde dort auch ein Keilschriftarchiv geborgen. Die jetzt entdeckten Grüfte sind über einen 40 Meter langen Korridor direkt vom Thronsaal aus zugänglich. Die Hauptkammer enthält einen steinernen Sarkophag sowie zahlreiche Gefäße aus Keramik, Alabaster und Granit, die aus dem 14. vorchristlichen Jahrhundert stammen. Den Eingang flankieren zwei sitzende Königsstatuen aus dem 17. oder 18. Jahrhundert. Sie sind vollständig erhalten; abgebrochene Teile liegen am Boden. Große unversehrte Steinfiguren aus dem damaligen Syrien gibt es bisher kaum. Die Statuen verkörpern vermutlich idealtypische Bildnisse verstorbener Könige. Opferschalen zu ihren Füßen liefern den ersten Beweis für Totenkult im Alten Orient. (*Universität Tübingen, 28.11.2002*)

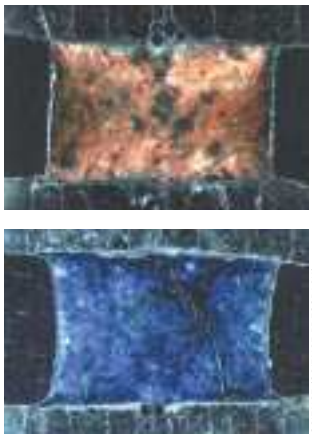
EBERHARD KARLS UNIVERSITÄT TÜBINGEN

▲ Vor dem Eingang zur Hauptgrabkammer mit dem Sarkophag wachen zwei 85 Zentimeter hohe Statuen.

GEOLOGIE

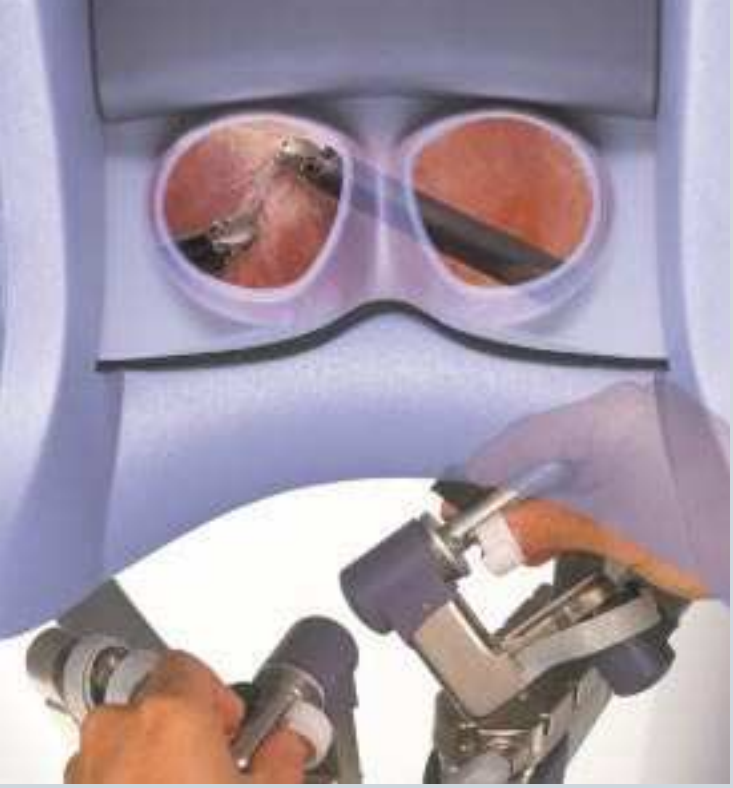
Tiefbeben durch Ultraschall

Wo ozeanische Kruste unter leichtere Kontinentalplatten abtaucht, kommt es bis zu 600 Kilometer unter der Oberfläche immer wieder zu Erdbeben. Der Grund dafür ist bis heute ein Rätsel; denn bei den hohen Temperaturen und Drucken in dieser Tiefe verformt sich das Gestein unter Spannung, statt – wie in bodennahen Schichten – ruckartig zu zerbrechen. Eine mögliche Erklärung fanden nun Wissenschaftler vom Bayerischen Geoinstitut und vom University College in London bei Experimenten mit Serpentinit. Sie unterwarfen das grünliche Gestein, das in abtauchender ozeanischer Kruste vorkommt, jenen extremen Bedingungen, die im Erdmantel in Tiefen von rund 200 Kilometern herrschen. Dazu setzten sie eine nur wenige Millimeter große Probe zwischen Diamantstempeln Drucken von 1,5 bis 8,5 Gigapascal (dem bis zu 85 000fachen des Luftdrucks) und Temperaturen bis zu 900 Grad Celsius aus. Bei dieser Behandlung gab das Gestein schließlich schlagartig Wasser ab und zerbröckelte unter Aussendung von Ultraschallwellen. Solche akustischen Emissionen können nach Ansicht der Forscher auch bei Subduktionsprozessen in etwa 200 Kilometer Tiefe freigesetzt werden und Erdbeben auslösen. (*Science, 15. 11.2002, S. 1407*)



SCIENCE (SCIENCE PRESSPACK)

▶ Durch Wasserverlust bei extremen Drucken und Temperaturen verfärbt sich Serpentinit blau, zerfällt und sendet Ultraschallwellen aus.



PHYSIK

Röntgenschnappschuss vom Inneren eines Atoms

Das Elektron des Wasserstoff-Atoms umrundet den Kern einmal in nur 24 Attosekunden (trillionstel Sekunden). Selbst die ultraschnelle Spektroskopie hat da keine Chance: Die kürzesten Laserpulse im sichtbaren Bereich sind einige tausend Attosekunden lang und können die Bewegung kernnaher Elektronen deshalb nicht auflösen. Markus Drescher von der Universität Bielefeld gelang es nun jedoch, einen nur 900 Attosekunden langen Röntgenpuls zu erzeugen. Mit ihm schlug er kernnahe Elektronen aus der Hülle von Krypton-Atomen. Das entstandene »Loch« füllte sich mit Elektronen aus weiter außen gelegenen Schalen. Wieder andere Elektronen übernahmen die dabei freigesetzte Energie und verließen das Atom. Sie wurden mit Hilfe eines zweiten, langwelligeren Laserstrahls vermessen. Ihre Energieverteilung in Abhängigkeit von der Zeit seit dem Röntgenpuls ermöglichte den Rückschluss auf die Dauer, während der das Loch bestand: Sie betrug rund 8000 Attosekunden. (*Nature, 24.10.2002, S. 803*)

SPORT

Hanteln für den Weitsprung

Mancher Jogger versucht, den Trainingseffekt durch Gewichte an den Händen zu steigern. Eine Erfindung unserer Zeit? Mitnichten, denn Hanteln gehörten schon zum Sportgerät im antiken Griechenland. Allerdings dienten sie dort nicht zur Verbesserung des Trainings, sondern zur Leistungssteigerung im Wettkampf selbst. Zu diesem Schluss kommen Alberto E. Minetti und Luca P. Ardigó von der Universität Manchester (England). Nach ihren Berechnungen schaffte ein griechischer Fünfkämpfer, der beim beidfüßigen Weitsprung aus dem Stand etwa drei Meter erreichte, mit Hanteln und der richtigen Technik ganze 17 Zentimeter mehr. Diese Steigerung führen die Forscher auf zwei Effekte zurück: Die beim Absprung nach vorn geschwungenen Gewichte verleihen dem Athleten einen zusätzlichen Impuls; werden sie während des Flugs nach hinten bewegt, verlagert sich zudem der Schwerpunkt des Körpers, wodurch sich der Sprungbogen um einige Zentimeter streckt. Doch das Gewicht der Hantel muss stimmen; mit zu großen Lasten verkürzt sich der Sprung wieder. Bei Versuchen mit Freiwilligen und Computersimulationen erwiesen sich drei Kilogramm in jeder Hand als ideal. Antike Sportler kannten offenbar schon 700 vor Christi Geburt das optimale Gewicht: Hanteln aus der damaligen Zeit wiegen zwischen 1,1 und 4,5 Kilogramm. (*Nature, 14.11.2002, S. 141*)

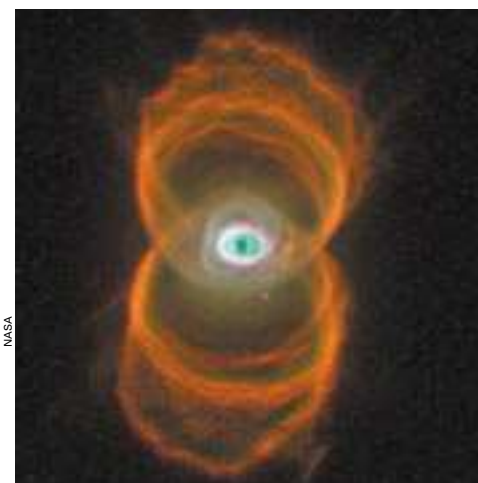
NATURE

▲ Zeichnungen auf Vasen beweisen: Griechische Athleten nutzten Hanteln wie die unten abgebildeten beim Weitsprung.

ASTROPHYSIK

Magnetfelder formen Planetarische Nebel

Planetarische Nebel gehören zu den schönsten Objekten im Kosmos. Sie entstehen, wenn ein sterbender Stern seine Hülle ins All schleudert und sie mit seiner ultravioletten Strahlung zum Leuchten bringt. Planetarische Nebel haben oft bizarre Formen. Der Grund dafür ist noch immer ein Rätsel. Bisherige Theorien, wonach etwa gebündelte Teilchenstrahlen der sterbenden Sterne die Symmetrie der Gaswolke stören, wirken wenig überzeugend. Jetzt glaubt ein Team um Wouter Vlemmings von der Sternwarte in Leiden (Niederlande) eine bessere Erklärung gefunden zu haben. Es vermaß die intensive Mikrowellenstrahlung aus der Umgebung ausgewählter Sterne in der Spätphase ihres Lebens. Dabei fand es schwache Aufspaltungen der Spektrallinien, die von einem lokalen Magnetfeld herrühren. Dieses erwies sich als zehn- bis hundertmal so stark wie das der Sonne. Damit kann es den Planetarischen Nebeln, deren Gasmoleküle großenteils ionisiert sind, seine Form aufprägen. (*Astronomy & Astrophysics, 11(1)/2002, S. 589*)



NASA

▶ Verdankt der Nebel MyCn18 die Sanduhr-Form dem Magnetfeld seines Vorläufersterns?

Schlote, die Schlamm statt Feuer speien

Mit ihrem sprudelnden Gemisch aus Tonbrei, Wasser und Methan sind Schlammvulkane weniger spektakulär und gefährlich als Asche und Lava ausstoßende Feuerberge. Bedeutung erlangen sie durch ihren Einfluss auf das Klima und ihre Verbindung mit Öl- und Gas-Lagerstätten.

Von Achim Kopf

Nur einen Steinwurf entfernt von den Ferrari-Werken in Maranello blubbern Gase und Wässer aus schlammigen Kegeln und Seen mit Durchmessern von einigen dutzend Metern. Mit Geschwindigkeiten, die durchaus an jene der nebenan gefertigten Rennwagen heranreichen können, steigt hier gasreicher Schlamm aus einigen Kilometern Tiefe auf. Ursache des gespenstischen Treibens ist ein »kalter« Vulkanismus. Er wirkt zwar nicht so spektakulär und bedrohlich wie die sehr viel bekanntere heiße Variante, bei der glühende Lava in Fontänen aus dem Boden schießt oder Asche kilometerhoch in die Luft geschleudert wird. Lokal bildet er aber sehr wohl eine Gefahrenquelle.

So besteht das austretende Gas größtenteils aus feuergefährlichem Methan. Es kann sich an der Luft selbst entzünden und dann beispielsweise explosionsartig Baumbestände entwurzeln. Tritt es am Meeresboden aus, verringert es die Dichte des darüber liegenden Meerwassers, indem es sich mit ihm vermischt, und bricht unter Umständen so heftig durch die Wasseroberfläche, dass Schiffe in der Nähe sinken – so geschehen vor der Ostküste Großbritanniens im Herbst 2000. In der Atmosphäre entfaltet Methan eine sehr viel stärkere Treibhauswirkung als das berüchtigte Kohlendioxid, in das es sich allerdings innerhalb weniger Jahre durch Reaktion mit Sauerstoff umwandelt.

Schon vor zwei Jahrhunderten, in der grauen Vorzeit der geowissenschaftlichen Grundlagenforschung, finden sich in Pionierstudien zur Morphologie der Erde Berichte über seltsame Kegel und Dome, die bei oberflächlicher Betrachtung wie überdimensionale Maulwurfshaufen aussehen. Solche Beobachtungen aus Indien, Persien, Westeuropa oder Russland tauchten damals regelmäßig in den Journalen naturforschender Gesellschaften auf. Selbst Goethe erwähnte im »Faust«, über Nacht sei ein Berg aus Schlamm aufgeworfen worden. Dabei irrte er allerdings; denn der Monte Nuovo in den phlegräischen Feldern bei Neapel, auf den sich diese Bemerkung bezieht, entstand durch normale vulkanische Aktivität. Man muss dem großen Dichter und Universalgenie den Fehler freilich verzeihen, denn zu seiner Zeit waren die meisten grundlegenden Mechanismen geologischer Vorgänge noch lange nicht entdeckt.

Immerhin erkannten die frühen Erdwissenschaftler schon bald, dass die »über-

PETER CLIFT, WOODS HOLE OCEANOGRAPHIC INSTITUTION (LINKS)/ACHIM KOPF (UNTEN)

Zu den eindrucksvollsten Schlammvulkanen gehört der Chandra Gup in Pakistan mit seinen von Erosionsrinnen zerfurchten Flanken. Kleinere Exemplare finden sich aber auch bei Maranello in Norditalien (rechts).

dimensionalen Maulwurfshaufen« trotz ihrer variablen Größe und Beschaffenheit alle auf ähnliche Weise entstehen. Stets dringen wasser- und gasreiche Tone aus dem Untergrund empor und treten in teils heftigen Eruptionen an der Erdoberfläche aus. Sowohl die Tiefe, aus der sie stammen, als auch die Geschwindigkeit des Aufstiegs können stark variieren. In jedem Fall aber ist Wasser erforderlich, um das Material im Untergrund zu mobilisieren.

In den 1930er Jahren wurden für das Phänomen die Begriffe sedimentärer Vulkanismus und Schlammdiapirismus geprägt. Der Erstere spielt auf die Analogie zu magmatischen Erscheinungen an, macht aber zugleich deutlich, dass in diesem Fall keine Gesteinsschmelze, sondern aufgeschlämmtes Sedimentgestein austritt. Die zweite Bezeichnung (von griechisch *diapeirein*, »durchdringen«) bezieht sich auf den Aufstiegsmechanismus, der dem von Salzdomen (Diapiren) ähnelt: Ein spezifisch leichteres Material erfährt, dem Prinzip des Archimedes folgend, einen Auftrieb und wandert durch dichteres Material gegen die Schwerkraft in Richtung Erdoberfläche.

Während beim normalen Vulkanismus flüssiges Gestein (Magma) und beim Salzdiapirismus Evaporite (Gips, Stein- und Kalisalze) ihr Überlager verdrängen oder entlang von Schwächezonen aufsteigen, werden im Fall von Schlammdiapiren gewöhnlich die tonreichsten Lagen in einer Gesteinsformation mobilisiert und wandern als pilzförmige Aufwölbung nach oben. Das liegt an den besonderen Eigenschaften des Tons. Für sich allein schon ist er spezifisch leichter als andere gesteinsbildende Minerale wie Quarz, Feldspat, Kalk oder Erze. Außerdem vermag er aber große Mengen Wasser zu speichern. Selbst feste Tonsteine, die bereits einige Kilometer tief versenkt wurden, können wieder Feuchtigkeit aufnehmen und quellen. Dabei erniedrigt sich ihre Dichte, sodass sie Auftrieb erhalten und nach oben steigen. Zudem sind gequollene Tonminerale sehr glitschig und haben eine geringe Viskosi- ▷

tät. Damit wirken sie gewissermaßen als Gleitmittel für den Schlamm.

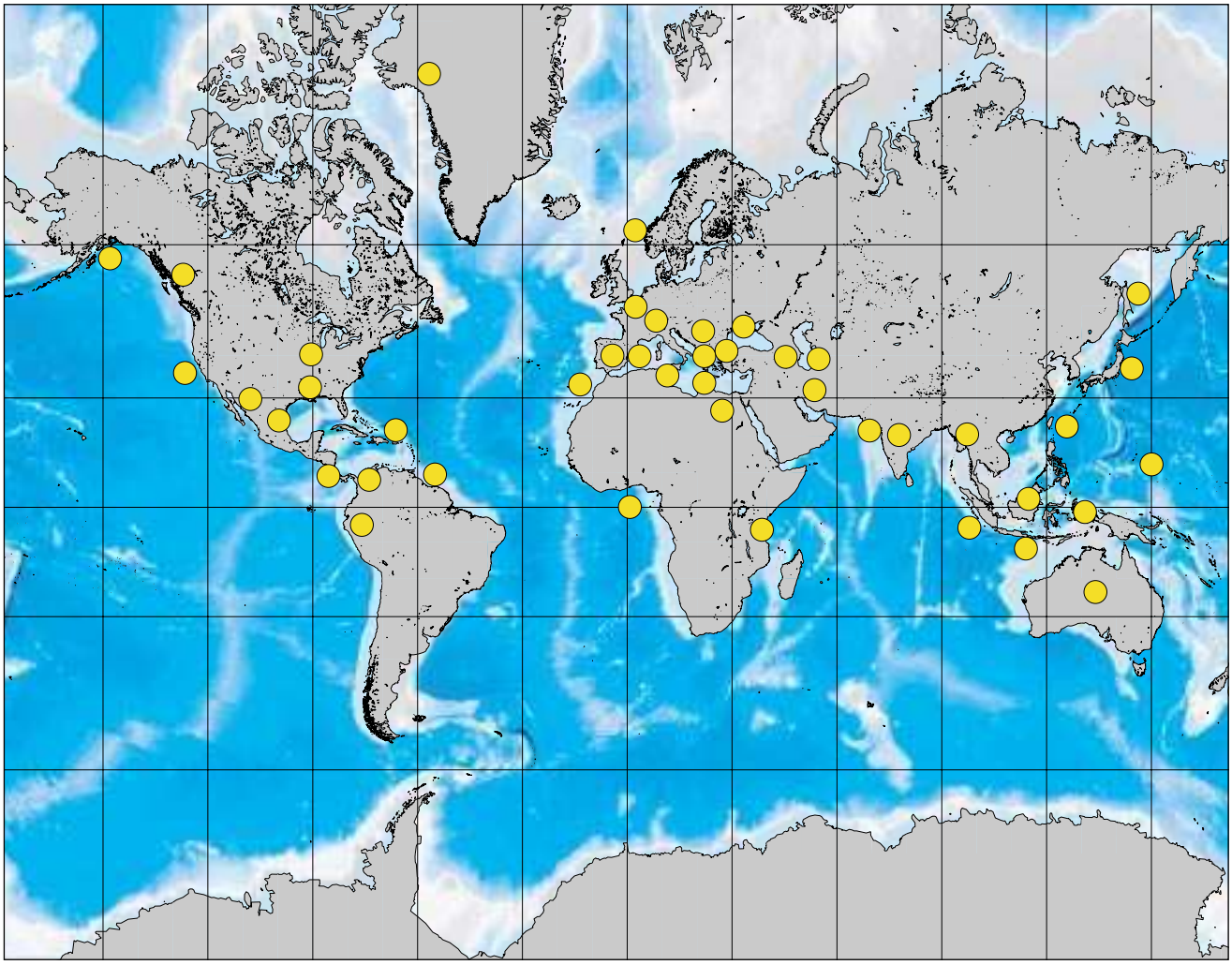
Ursprünglich waren Schlammvulkane nur an Land bekannt. So untersuchte sie der deutsche Erdwissenschaftler Otto Wilhelm Hermann von Abich (1806–1886), Mineralogie-Professor an der Universität der estnischen Stadt Dorpat (Tartu), im 19. Jahrhundert in der Umgebung des Kaspischen Meeres. Dabei beobachtete er 1863 bereits einen Ausbruch in dem Gewässer selbst, bei dem eine neue Insel entstand. In den 1930er Jahren erforschte der Schweizer Erdölgeologe Hans G. Kugler (1894–1986) den Schlammvulkanismus auf der Karibik-Insel Trinidad, die für das Phänomen berühmt ist.

Schlammvulkane (gelbe Punkte) sind weltweit an Land und am Meeresboden zu finden. Sie konzentrieren sich auf Subduktionszonen, an denen ozeanische Kruste unter kontinentale abtaucht, sowie auf Gebirgsgürtel.

Verbesserte geophysikalische Untersuchungsmethoden erlaubten es in den vergangenen Jahrzehnten, zahlreiche geologische Strukturen am und unterhalb des Meeresbodens mit hoher Auflösung abzubilden, die zuvor gar nicht oder nur vage bekannt waren. Dabei zeigte sich, dass auch am Meeresgrund kleine bis mittelgroße Berge aus tonreichen Sedimenten vorkommen. Tatsächlich sind sedimentäre Vulkane nicht nur an Land, sondern auch in den Ozeanen weit verbreitet. Unter Wasser werden sie durch Meeresströmungen allerdings relativ schnell wieder abgetragen. Der geringe Widerstand, den die aus unverfestigtem Schlamm bestehenden Strukturen der Verwitterung entgegensetzen, erklärt auch, weshalb fossile Exemplare aus frühen Epochen der Erdgeschichte so gut wie nicht erhalten sind.

Obwohl sedimentäre Vulkane in geologisch sehr unterschiedlichen Regionen vorkommen, haben sie eine erstaunlich ähnliche Zusammensetzung. Schlamm ist per Definition eine Mischung von mindestens fünfzig Prozent Ton mit kleineren Beimischungen von Silt (0,02–0,63 Millimeter Korngröße) und Sand (0,63–2 Millimeter). Bei seinem teils gewaltsamen Aufstieg aus der Tiefe – in der Regel entlang einer tektonischen Verwerfung oder anderen Schwächezone – reißt er oft lose Brocken des Nebengesteins mit. Diese Trümmer können Durchmesser von einigen Millimetern bis zu etlichen Metern erreichen. Sie legen beredtes Zeugnis von der Gewalt des aufdringenden Schlamms ab und lassen unmittelbar erkennen, welche Gesteinsserien er auf dem Weg zur Oberfläche durchquert hat. Außerdem verleihen die bereits verfestigten Brocken dem sich bildenden Vulkankegel an der Oberfläche Stabilität und erlauben dadurch Hangneigungen bis zu 15 Grad.

Zwar finden sich Schlammvulkane praktisch überall auf der Erde, doch konzentrieren sie sich an Stellen, an denen zwei der starren Platten, welche die feste Erdschale (Lithosphäre) aufbauen und wie Eisschollen auf dem zähplastischen Erd-



ACHIM KOPF

Schlammvulkane am Meeresgrund ernähren mit dem austretenden Methan oft spezielle Lebensgemeinschaften. Die Fotos stammen von einer Expedition des Alfred-Wegener-Instituts und des Französischen Forschungsinstituts zur Nutzung des Meeres zum Håkon Mosby in 1260 Meter Tiefe vor Norwegen. Man sieht jeweils den Greifarm des französischen Tauchroboters »Victor 6000« bei der Probennahme. Im linken Bild ist das Sediment mit weißen Matten von Schwefelbakterien besiedelt, die den von Methanoxidierern freigesetzten Schwefelwasserstoff nutzen. Auf dem rechten Foto ragen die Tuben von Röhrenwürmern, die mit den Bakterien in Symbiose leben, wie Grasbüschel aus dem Boden. Links unten sind zudem zwei Asselspinnen und ein Schlangenstern zu erkennen.

BEIDE FOTOS: EBERHARD SAUTER, AWI

mantel treiben, zusammenstoßen und gegeneinander vorrücken. Der Grund dafür ist leicht einzusehen. An solchen Kollisionszonen werden Sedimente gequetscht und dabei ausgepresst und entwässert. Zugleich ist der Gesteinskörper oft bis einige Kilometer hinab mit Störungen durchsetzt. Ein Schlammkörper in der Tiefe nutzt diese Schwächezonen, um sich seinen Weg an die Erdoberfläche zu bahnen.

Typische Kollisionsbereiche sind so genannte Subduktionszonen. An ihnen schiebt sich eine ozeanische Platte unter einen Kontinentalrand, wobei sich oft ein Tiefseegraben bildet. Die ozeanische Platte besteht aus basaltischem Material, auf dem sich je nach ihrem Alter eine unterschiedlich mächtige Sedimentschicht abgelagert hat. Diese kann anfangs siebzig bis achtzig Prozent Wasser enthalten. Es steckt vor allem in den Zwischenräumen blättchenförmiger Tonminerale, die sich zunächst in einer sehr lockeren Kartenhausstruktur anordnen.

Wenn die Platte unmittelbar vor ihrer Subduktion in den Bereich des Tiefseegrabens gerät, sammelt sich rasch weiteres Material darauf an, das vom Kontinentalrand und dem Festlandsockel abrutscht. Unter dieser zusätzlichen Auflast beginnt das »Kartenhaus« der Tonblättchen zu kollabieren, und das Porenwasser wird nach und nach ausgepresst. Gleichzeitig wandert das Sediment jedoch mit der abtauchenden Platte unter die kontinentale Platte, was die Freisetzung des Wassers erschwert. Wenn dieses nicht schnell genug zurück ins Meer entweichen kann, werden wasserreiche Sedimente in größere Tiefen verfrachtet, wo sie relativ zum herrschenden Druck zu viel Porenvolumen haben. Es kommt zu einem so genannten Fluid-Überdruck. Zugleich entwickelt ein solches wasserbeladenes Sediment einen beträchtlichen Auftrieb, da es weniger dicht (spezifisch leichter) ist als das Gestein darüber. Diese »Dichte-Inversion« ist ein Grund für die starke Aufwärtstendenz.

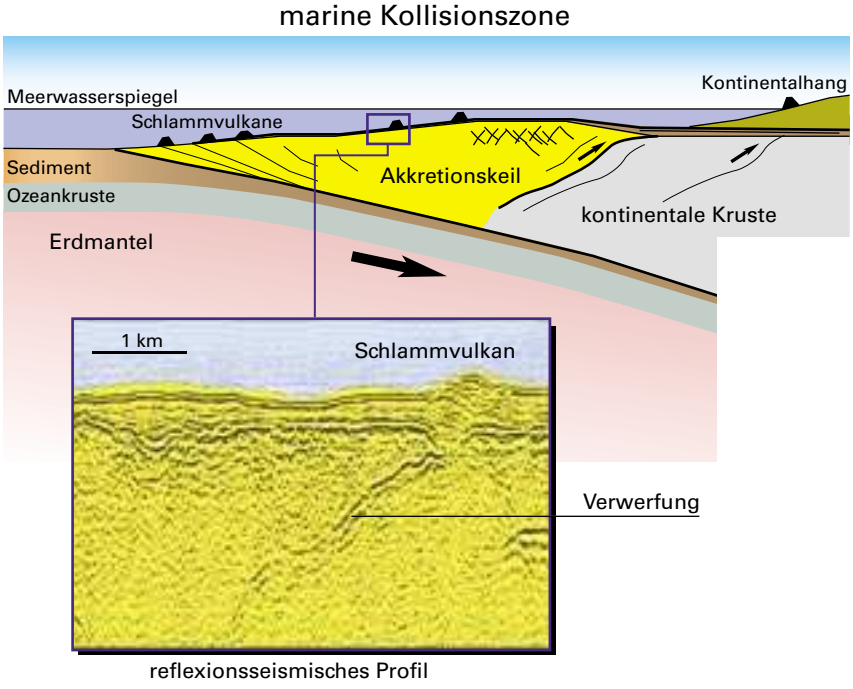
Zersetzung biologischer Reste im Sediment zu Methan

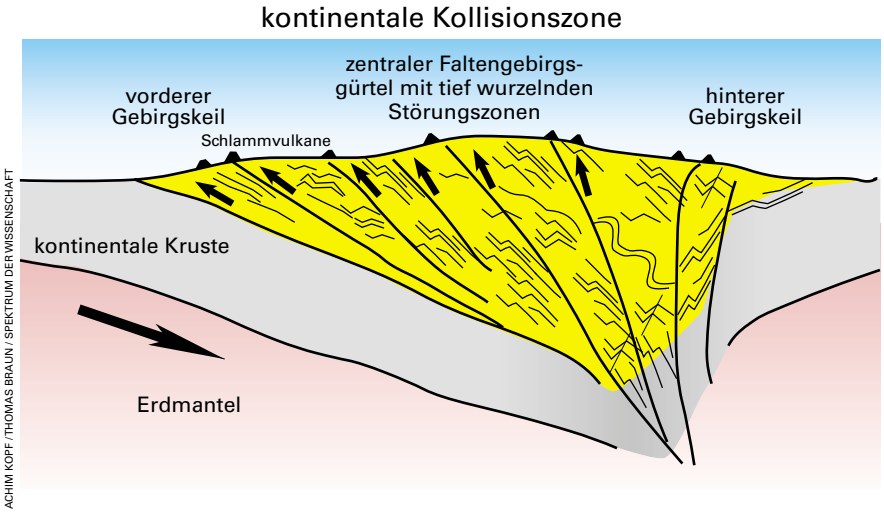
Ein zweiter Faktor kommt hinzu. Der Erosionsschutt, der sich im Tiefseegraben sammelt, enthält auch viel organisches Material. Kontinentalränder sind Zonen, an denen nährstoffreiches Wasser aufsteigt. Zudem führen einmündende Flüsse außer Sedimenten auch Nährstoffe heran. Kontinentalhänge und insbesondere die Flachwasserbereiche über dem Festlandsockel sind deshalb reich an Mikroorganismen, die nach ihrem Tod auf den Meeresboden sinken. Das feine, lockere Gesteinsmaterial, das den Schelfhang hinab in den Tiefseegraben rutscht, baut diese organischen Reste ins Sediment ein.

Während die ozeanische Platte dann in der Subduktionszone abtaucht, heizt sie sich allmählich auf. Mit steigender Temperatur wandelt sich das organische Material chemisch um. Dabei entstehen zunächst kurzkettige flüchtige Kohlenwasserstoffe – vor allem Methan. Dieses Gas erhöht den Fluid-Überdruck der rasch abgelagerten Sedimente zusätzlich, verstärkt so die Dichte-Inversion und steigert damit den Auftrieb. Wenn der Schlamm schließlich empordringt und in flachere Tiefenstockwerke gelangt, dehnt sich das Methan dramatisch aus, was zu heftigen Ausbrüchen an Land und unter Wasser führen kann.

War das Methan in der Tiefe gar als festes Gashydrat, einer eisähnlichen Substanz aus gefrorenem Wasser und Methan, gespeichert, kann es beim Aufstieg schmelzen und sich um das über 150fache ausdehnen (siehe »Brennendes Eis – Methanhydrat am Meeresgrund«, Spektrum der Wissenschaft 6/1999, S. 62). Im Extremfall treten dabei binnen Tagen bis zu einer halben Million Kubikmeter Schlamm aus, der sich in Strömen einige hundert Meter weit wälzt. Das aufsteigende Gas kann auch gefährliche großräumige Rutschungen auslösen, wenn es sich dicht unter der Oberfläche ausdehnt.

Während Salzdiapire um wenige Millimeter pro Jahr nach oben vordringen, liegt die Aufstiegsgeschwindigkeit von Schlamm viel höher. Abschätzungen, die nur die Dichte-Inversion als Triebkraft berücksichtigen, liefern bei einem Schlotdurchmesser ▷





ACHIM KOPF / THOMAS BRAUN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Schlammvulkane finden sich oft in Subduktionszonen über »Akkretionskeilen«: Anhäufungen von Sedimenten, die der Kontinent von der unter ihn abtauchenden ozeanischen Platte abgeschabt hat (oben). Wird das Meer völlig geschlossen, kann sich ein Gebirgsgürtel bilden, an dem zwei Kontinente kollidieren. Dabei werden Sedimentgesteine in große Tiefen verfrachtet und entwässert (unten). Schlammvulkane dringen an den tief wurzelnden Störungen dieses Gebirgskeils auf. Das eingeklinkte Seismogramm zeigt einen submarinen Schlammvulkan über einer Verwerfung auf dem Akkretionskeil im Mittelmeer, der durch die Kollision von Afrika mit Europa deformiert und ausgepresst wird.

▷ von einem Meter bereits Werte um zwei Millimeter pro Sekunde oder fast siebzig Kilometer pro Jahr. Schon ein bis zehn Prozent Gas zusätzlich, die im Porenwasser gelöst sind, können die Aufstiegsgeschwindigkeit jedoch auf über hundert Meter pro Sekunde – schneller als ein Rennwagen – hochjagen. In diesem Fall sind selbst Schlammausbrüche aus einigen Kilometern Erdtiefe eine Sache von Sekunden.

Die unterschiedliche Vehemenz des Aufstiegs spiegelt sich auch in der Oberflächengeometrie von Schlammvulkanen wider. Wenn der Weg frei ist, kann der Tonbrei langsam und friedlich empordringen und an der Oberfläche trocknen und aushärten, bevor weiteres Material nachströmt. In diesem Fall entstehen eher schmale, steile Dome mit einer Hangneigung von mehr als fünf Grad. Bei etwas höheren Aufstiegsgeschwindigkeiten bilden sich dagegen flachere Kegel oder Fladen, die Durchmesser von mehreren dutzend Kilometern erreichen können.

Heftiger, gasgeladener Schlammausstoß schließlich erzeugt kraterähnliche Senken. Zu einer solchen explosiven Freisetzung kommt es, wenn das Gestein über dem Schlammreservoir für Gas fast undurchlässig ist. Dann baut sich ein enormer Druck auf, der die überlagernden Schichten irgendwann gewaltsam sprengt, was in der Regel ein Erdbeben auslöst. Die resultierenden Ausbrüche gehen oft mit der katastrophalen Freisetzung großer Mengen an Methan einher.

Die größten bekannten Schlammvulkane an Land haben bis zu acht Kilometer Durchmesser. Da sie meist in Gruppen auftreten, bedecken ihre Ausflüsse oft weite Flächen. In der Kaukasus-Region sind aus Georgien und Aserbaidschan sowie aus dem Schwarzen und Kaspischen Meer über 300 Schlammvulkane von zum Teil beachtlicher Größe beschrieben worden. Der Kaukasus ist ein alter Gebirgskeil, der vor etwa 30 Millionen Jahren entstand, als die Arabische Kontinentalplatte mit Eurasien kollidierte und dabei einen ehemaligen Ozean namens Tethys einengte und schließlich ganz schloss. Die Sedimente am Boden dieses Meeresbeckens wurden ineinander verschuppt, verfaltet und zum Teil bis zu 15 Kilometer tief versenkt. Ein Teil des tonreichen Materials dringt nun an weit hinabreichenden Störungen im Gebirgskeil als Gesteinsbrei wieder an die Erdoberfläche.

Schlammvulkane häufen sich auch an kontinentalen Verwerfungszonen auf Trinidad, in den Pyrenäen und Alpen sowie im Apennin. Bei einzelnen Ausbrüchen werden zum Teil enorme Materialmengen gefördert. Nach historischen Überlieferungen sind in Aserbaidschan manchmal innerhalb weniger Stunden bis Tage mehr als 150000 Kubikmeter Schlamm und Trümmergestein ausgetreten.

Sogar 250000 Kubikmeter Schlamm waren es, die im August 1964 innerhalb von zwei Tagen die Insel Chatham vor der Küste Trinidads entstehen ließen. Sie erreichte einen Durchmesser von etwa 200 Metern, erhob sich aber nur wenige Meter über den Meeresspiegel und verschwand

nach acht Monaten wieder. Die unstete Insel war bereits durch Eruptionen in den Jahren 1911 und 1928 aufgetaucht und tat das zum vorerst letzten Mal im Mai 2001.

Solche Ausbrüche im Flachwasser treten nicht selten an Störungszonen innerhalb des Festlandsockels auf. Im März 1999 entstand vor der Küste Pakistans aus knapp 160 000 Kubikmeter Schlamm, die aus einer Wassertiefe von zehn Metern aufdrangen, die kleine Insel Malan. Auch sie wurde schon nach einigen Wochen wieder ein Raub der Wellen.

Andere Beispiele für küstennahe Extrusionen an Land sind ausgedehnte Schlammdome in Pakistan, weiten Teilen Indonesiens, Taiwan und auf Barbados. Submarin wurden noch weit größere Schlammextrusionen entdeckt. Am häufigsten finden sie sich im Bereich der Kleinen Antillen und im östlichen Mittelmeer. Um die Insel Barbados herum ist der Meeresboden mit über 450 Schlammvulkanen gespickt, die zum Teil bis sechs Kilometer Durchmesser erreichen. Auch auf dem Mittelmeerrücken, der als sichelförmiges submarines Gebirge von Süditalien bis Zypern reicht und sich etwa zwei Kilometer über den Untergrund erhebt, befinden sich mehr als 200 Exemplare unterschiedlicher Geometrie. Tiefseebohrungen im Jahre 1995 ergaben, dass sie schon seit über einer Million Jahre aktiv sind. Bei Tauchfahrten mit dem französischen Unterseeboot Nautile, das auch die Titanic am Meeresgrund filmte, konnten Wissenschaftler direkt beobachten, wie Methan aus dem Boden entwich.

Auf den submarinen Schlammvulkanen ernährt das Gas eine vielfältige Lebensgemeinschaft aus Bakterien, Röhrenwürmern, Muscheln und anderen Tieren, die auf dieses unwirtliche Habitat in etwa zwei Kilometer Wassertiefe spezialisiert sind. Selbst höhere Lebewesen wie Fische, die sich an den hohen Druck und die völlige Dunkelheit angepasst haben, wurden bei den Tauchfahrten beobachtet.

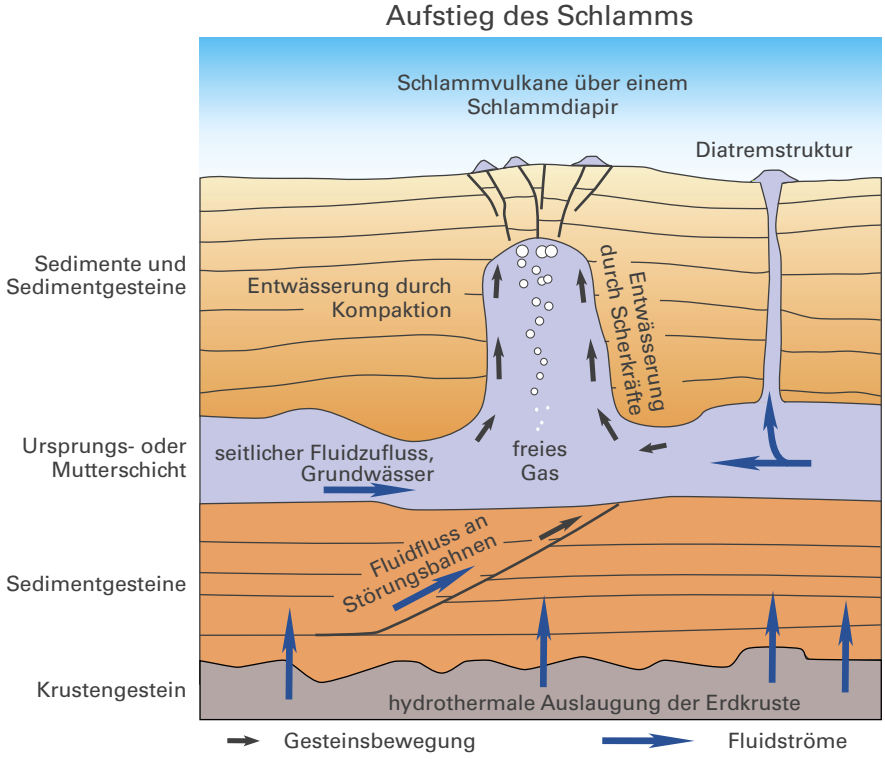
Plötzliche heftige Ausbrüche nach langen Ruhephasen

Das Mittelmeer beherbergt auch einige der größten bekannten Schlammvulkane. Schildförmige Gebilde von bis zu vierzig Kilometer Durchmesser wurden entdeckt; allerdings sind sie im Durchschnitt maximal 500 Meter hoch. Imposanter wirken die grünlichen Serpentinitdome am elf Kilometer tiefen Marianengraben im Westpazifik, dem tiefsten Punkt der Erde, die aus hydratisiertem Material des Erdmantels bestehen. Sie haben zwar nur bis etwa dreißig Kilometer Durchmesser, erheben sich aber bis zu zwei Kilometer über den umgebenden Meeresboden. Schätzungen zufolge sind einige davon schon im Eozän entstanden, also vor 34 bis 55 Millionen Jahren.

Genau wie die Asche und Lava speienden Feuerberge geben sich auch Schlammvulkane ausgesprochen launisch: Nach langen Zeiten relativer Ruhe, in denen nur passiv Methan ausgast, ereignen sich plötzlich kurze, heftige Eruptionen. Die solidesten statistischen Daten über die Ausbruchshäufigkeit liegen aus Aserbaidschan vor, wo historischen Überlieferungen zufolge jeder Schlammvulkan durchschnittlich alle fünfzig Jahre einmal aktiv wird. Manche Exemplare, die auf tektonisch besonders aktiven Störungen sitzen, übertreffen diesen Mittelwert aber bei weitem. So ist Lokbatan auf der Halbinsel Aspheron am Kaspischen Meer zwischen 1828 und 1990 nicht weniger als 22-mal ausgebrochen – das heißt alle sieben bis acht Jahre.

In seltenen Fällen werden Gasausbrüche auch von Menschenhand ausgelöst. Wenn der Bohrer bei der Exploration auf fossile Brennstoffe ein Gasreservoir oder eine Gas führende Schicht trifft, bewirkt die plötzliche Druckentlastung, dass geysirartig Gas-, Wasser- und Schlammfontänen emporschießen. Auch für die marinen Schlammvulkangebiete ist ein episodisches Verhalten bezeugt; allerdings lassen sich die Ruhephasen zwischen Schlammextrusionen anhand von Mikrofossilien nur auf einige tausend Jahre genau datieren.

Schon früh zeigte sich ein Zusammenhang zwischen Kohlenwasserstoffvorkommen in der Tiefe und Schlammextrusion an der Erdoberfläche. Dieser potenzielle ökonomische Nutzen weckte das Interesse ▷



Schlammvulkane fördern ein Gemisch aus Tonen, Wasser und Gas. Es kann direkt aus der tiefen tonreichen Mutterschicht zur Oberfläche durchbrechen – man spricht dann von Diatremen – oder über einem pilzähnlich aufdringenden Schlammkörper (Diapir) austreten. Wichtigste Quellen der Fluide (Flüssigkeiten und Gase), die den Tonbrei antreiben, sind das bei der thermischen Zersetzung organischer Materie entstehende Methan sowie Wasser, das bei der Verdichtung der Sedimente oder durch mineralisch-chemische Umwandlungen in der Tiefe freigesetzt wird. Beides kann entlang von tektonischen Störungen oder Grundwasser leitenden Schichten zum Diapir vordringen. Auch die Erdkruste enthält bis zu acht Prozent Wasser, das bei den hohen Drucken und Temperaturen in einigen Kilometern Tiefe das Gestein auslaugt.

▷ der Ölindustrie am sedimentären Vulkanismus und trieb so seine Erforschung voran. Allerdings geschah das auf einseitige Weise: Im Vordergrund stand das Bestreben, zu verlässlichen Abschätzungen über das Niveau zu gelangen, in dem sich die Gas- oder Ölvorkommen befinden.

Diese Aufgabe erwies sich freilich als kniffelig: Die genaue Herkunft des aufgedrungenen Materials lässt sich meist nur in detektivischer Kleinarbeit bestimmen. Die einzelnen Komponenten können nämlich aus sehr unterschiedlichen Niveaus stammen. Insbesondere die fluiden Anteile – wässrige Lösungen und Gase – kommen oft aus großen Tiefen, im Falle von Faltengebirgen sogar zum Teil aus dem Erdmantel. Sie wandern durch die darüber liegenden Schichten und verflüssigen erst in höheren Stockwerken Tonsteine, die sie dort antreffen. Der so entstehende Schlamm sammelt auf seinem Weg an die Oberfläche dann seinerseits lose Gesteinsbrocken der höheren Schichten auf, die gemeinhin jünger sind. Diese mitgerissenen Trümmer erschweren Altersbestimmungen des Tons und damit Rückschlüsse auf dessen Ablagerungstiefe. Wegen solcher Komplikationen betrachtet man die Herkunft der Auswurfprodukte von Schlammvulkanen in der Regel gesondert nach ihrem Aggregatzustand.

Die feste Komponente, bestehend aus Schlamm und Trümmern, kann im einfachsten Fall mit Gesteinen aus der Umgebung verglichen werden. Da geologische Schichten oft nicht horizontal verlaufen, liegt eine solche Schicht an einer Stelle möglicherweise sehr tief, während sie in einigen Kilometern Entfernung an der Oberfläche ausstreicht. Durch Rekonstruktion des dreidimensionalen Bildes verfalteter Tonsteine anhand geologischer Karten gelingt es unter Umständen, die Ausgangs- oder Mutterschicht eines Schlammvulkans zu lokalisieren. Im Kaukasus liefern solche Interpretationen in erster Näherung Tiefen bis zu zwölf Kilometern.

Der Schlammquelle auf der Spur

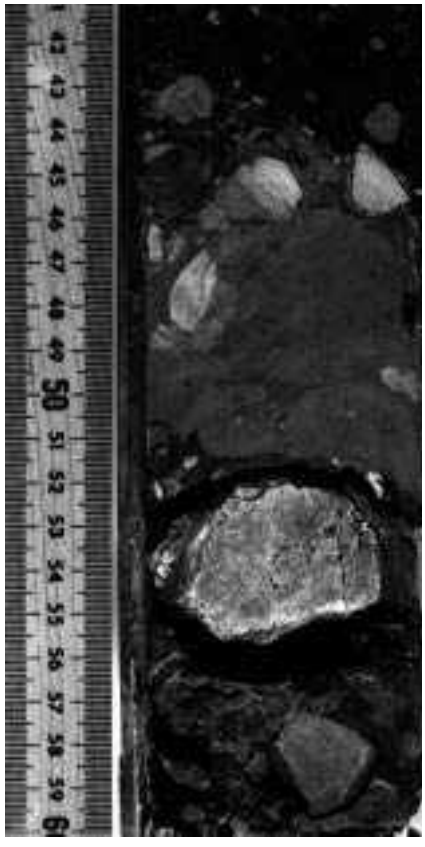
Andere Methoden basieren darauf, dass sich organische Bestandteile des Sediments bei der zum Erdinneren hin steigenden Temperatur in charakteristischer Weise umwandeln – oder reifen, wie Erdölgeologen sagen. So werden Kohlenwasserstoffe mit zunehmender Verweildauer und Erwärmung in der Tiefe langkettiger.

Doch auch andere Komponenten im Sediment verändern sich bei Druck- und Temperaturzunahme. Biogener Opal, ein amorphes Silikat, aus dem die Gehäuse der Diatomeen aufgebaut sind, wandelt sich in Quarz um. Dabei wird Wasser freigesetzt. Das Gleiche geschieht, wenn Smektit – ein in marinen Ablagerungen häufiges Tonmineral – zu Illit wird. Das abgespaltene Wasser kann dann unmittelbar Schlammvulkanismus antreiben. Die chemischen und mineralogischen Veränderungen im Gestein lassen sich bestimmten Temperaturbereichen im Erdinnern zuordnen und erlauben so Rückschlüsse auf die Tiefe der Mutterschicht eines Schlammvulkans.

Aber auch die im Wasser gelösten Ionen sind verräterisch. So entweichen »volatile« Elemente wie Bor, Stickstoff, Cäsium, Barium, Antimon und Uran schon bei weniger als 100 Grad Celsius aus dem Gestein und lösen sich im Porenwasser. Mit zunehmender Temperatur ereilt dieses Schicksal auch weniger mobile Elemente wie Arsen, Lithium oder Beryllium. Zudem finden Fraktionierungsprozesse statt, bei denen sich das Verhältnis zwischen den verschiedenen Isotopen eines Elements ändert. All das ermöglicht Aussagen über die Ausgangstiefe der Wässer. Selbst in nicht mehr aktiven Schlammvulkanen können diese geochemischen Signaturen »eingefroren« sein, weil Ausfällungsprozesse das Porenwasser als Carbonat fixieren. Diese Zementation des Schlamms macht den Vulkan zugleich stabiler und schützt ihn vor Erosion.

KEVIN BROWN, SCRIPPS INSTITUTION OF OCEANOGRAPHY

Der Tonbrei eines Schlammvulkans kann beim raschen Aufstieg auch große Brocken Fremdgestein mitreißen – wie hier auf der Insel Timor (Indonesien) ein mächtiges Kalksteinfragment.



ACHIM KOPF

Kalk- und Sandsteinstücke im Bohrkern aus einem Schlammdom auf dem Mittelmeer-Akkretionskeil zeigen, dass dieser sowohl Material vom Afrikanischen Schelf als auch von der griechischen Insel Kreta aufgenommen hat. Der Bohrkern stammt aus etwa 150 Metern Tiefe unter dem Meeresboden.

ACHIM KOPF

Wie dieser brennende Schlammvulkan in Sabah (Indonesien) beweist, kann sich austretendes Methan bei Hitze selbst entzünden und dann lokale Umweltschäden hervorrufen.

Auch die Gase sind geochemisch aufschlussreich. Insbesondere bilden die Beimischungen der längerkettigen Kohlenwasserstoffe Ethan, Propan oder Butan zum fast allgegenwärtigen Methan eine Art Thermometer, das die maximal erreichten Temperaturen in der Tiefe anzeigt. Andere Gase wie Kohlendioxid oder Helium können in Einzelfällen sogar aus unteren Lagen der Erdkruste oder aus dem Erdmantel stammen. Deshalb treten sie insbesondere in Kollisionszonen auf, wo Gebirge aufgeworfen werden. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das Verhältnis der verschiedenen Gase, Wässer und Feststoffe eines Schlammvulkans wichtige Steine im Puzzle seiner Entstehung und Geschichte liefert.

Generell zählt der Stoffumsatz von Schlammvulkanen zu den Eigenschaften, für die sich Geologen am meisten interessieren, da er im Kreislauf der Gesteine und ihrer Formationswässer eine wichtige Rolle spielt. Um ihn abzuschätzen, ist es notwendig, vor allem die bisher nicht so gut bekannten submarinen Dome genau zu charakterisieren. Zu diesem Zweck wurde bei zahlreichen Erkundungsfahrten im Mittelmeer dessen Untergrund mit Sonarverfahren und anderen geophysikalischen Aufnahmetechniken flächendeckend kartiert. Außerdem haben Erdwissenschaftler den gesamten Bereich südlich von Kreta mit einem engen Netz seismischer Profile überzogen. Dabei werden mit einem Schallsignal, das von den Gesteinsschichten in der Tiefe reflektiert wird, längs einer Messlinie geologische Strukturen durchleuchtet und abgebildet – ähnlich wie der menschliche Körper in einem Röntgenbild. Der wasserreiche Schlamm lässt sich daran erkennen, dass er den Schall langsamer weiterleitet als Festgestein.

Überraschende Funde im Mittelmeer

Vor allem der Mittelmeerrücken wurde eingehend untersucht. Geologisch handelt es sich dabei um einen so genannten Akkretions- oder Anwachskeil. Eine solche Struktur entsteht an Subduktionszonen, wenn der Kontinent – in diesem Fall Europa mit seinem vorgelagerten Festlandsockel – Sedimente von der unter ihn abtauchenden ozeanischen Platte abschabt, die sich dann wie Schnee, der von einem Schneepflug aufgeschoben wird, fächerförmig vor seinem Rand anhäufen.

Die geophysikalischen Erkundungen im Mittelmeer zeigten, dass sich die Schlammvulkane entlang dieses Anwachskeils in drei Regionen konzentrieren. An seinem südlichen Rand finden sich kleine Dome mit Durchmessern unter einem Kilometer. Sie werden durch das Porenwasser gespeist, das aus den Sedimenten im Tiefseegraben ausgepresst wird.

Etwa 100 bis 150 Kilometer weiter nördlich tritt ein zweiter Schlammvulkangürtel auf. Er besteht aus weit größeren Domen mit Durchmessern bis knapp zehn Kilometer, die viele Gesteinstrümmer enthalten. Wegen dieser heterogenen Struktur streuen sie das Schallsignal stark und erscheinen auf den geophysikalischen Karten schwarz. Der dritte Bereich mit Schlammextrusionen liegt weiter im Osten. Hier wird der Keil nicht so stark eingeengt; zudem erlauben weitere Störungssysteme das Austreten großer Schlammvolumina.

Diese Befunde waren unerwartet. Schließlich geht die Hauptmenge des Porenwassers der Sedimente bereits im Frontalbereich des Anwachskeils durch Verdichtung und Auspressen verloren. Deshalb sollte das Wasserangebot im tieferen hinteren Abschnitt des Sedimentfächers zum Kontinent hin exponentiell abnehmen. Umso erstaunlicher ist es, dass die Mehrzahl der Schlammvulkane im Mittelmeer erst bis ▷

▷ zu 150 Kilometer hinter der Keilfront auftritt. Offenbar stammt das benötigte Wasser hauptsächlich von chemisch-mineralischen Umwandlungen, die mit einer Dehydratisierung einhergehen. Die tief wurzelnden Störungssysteme in diesen Regionen scheinen es dann hydraulisch zu leiten und so die Plattengrenze zwischen Europa und Afrika zu drainieren.

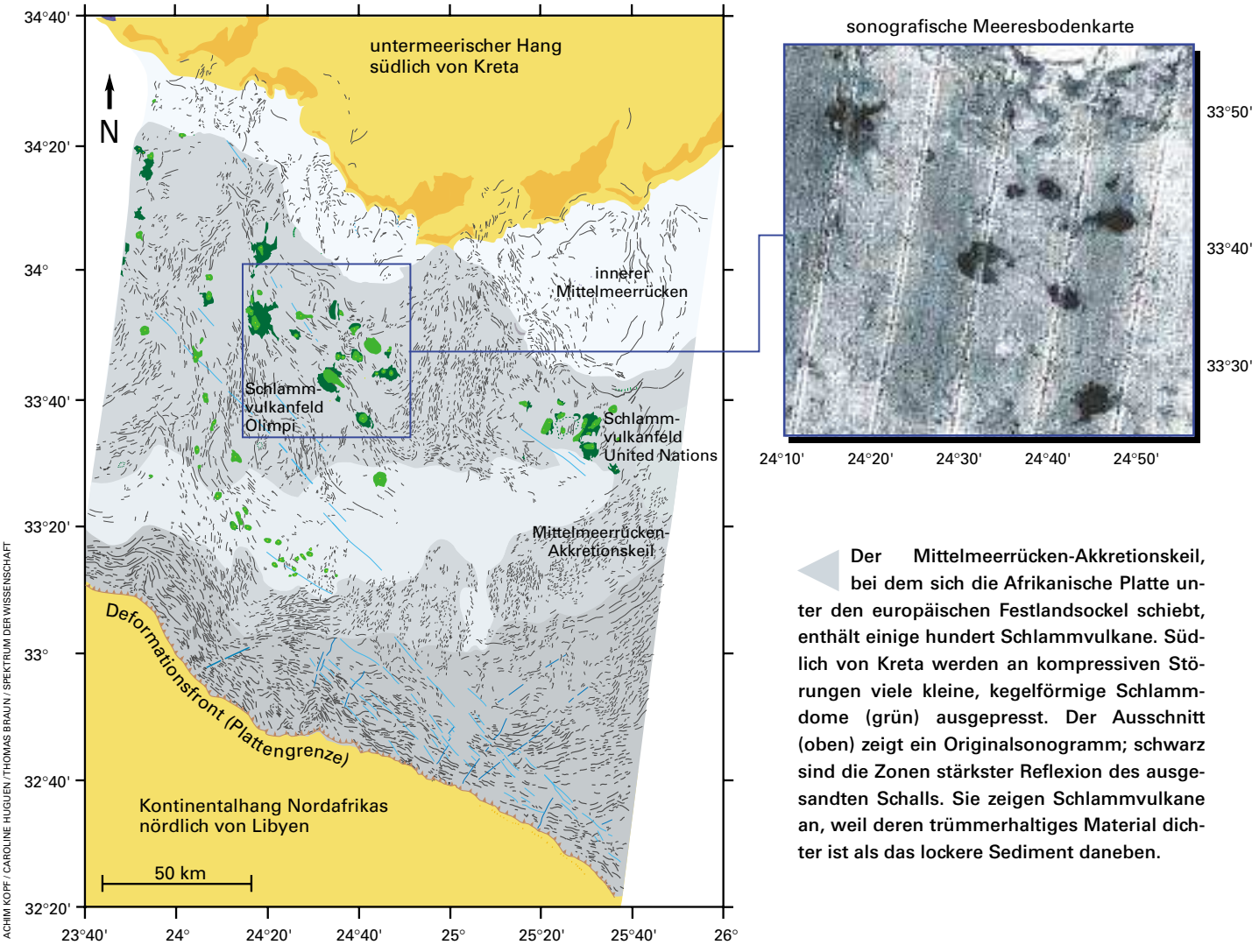
Jedenfalls lässt sich aus dem beobachteten Schlammvulkanismus im östlichen Mittelmeer ableiten, dass während der vergangenen Million Jahre mehr Wasser im hinteren Anwachskeil ausgetreten ist als im Frontalbereich. Wenn dies auch für andere Subduktionszonen gilt, müssten die bisher angenommenen Bilanzen für den Stofftransport deutlich revidiert werden. Das gilt nicht nur für die Wassermengen selbst, sondern vor allem auch für viele volatile Elemente. Diese erreichen in dem austretenden Tonbrei manchmal das Zwanzigfache ihrer Konzentration im Meer. Insgesamt sorgen Schlammvulkane also für den Rückfluss großer Mengen von Wasser und Mineralstoffen aus der Litho- in die Hydrosphäre und tragen damit entscheidend zum Stoffkreislauf der Erde bei.

Hundert Meter hohe Stichflammen

Eine ganz besondere Bedeutung hat jedoch ihr Ausstoß von Gasen. Sie bestehen nämlich im Durchschnitt zu über neunzig Prozent aus Methan. Lokal kann der Gasausstrom deshalb verheerende Folgen haben. Beim Ausbruch des Lokbatan in Aserbaidschan am 5. Januar 1887 schoss laut Augenzeugenberichten eine Stichflamme 600 Meter in die Höhe. Ähnlich spektakulär entgaste 1911 der Schlammvulkan Erin auf Trinidad, dessen rund hundert Meter hohe Flamme mehr als 15 Stunden loderte. Unweit davon wurden bei der Explosion des kolumbianischen La Lorenza im Oktober 1976 Häuser und Bäume im Umkreis von acht Kilometern zerstört. Die hundert Meter hohe Stichflamme brannte mehrere Tage, ehe die heftige Eruption stoppte.

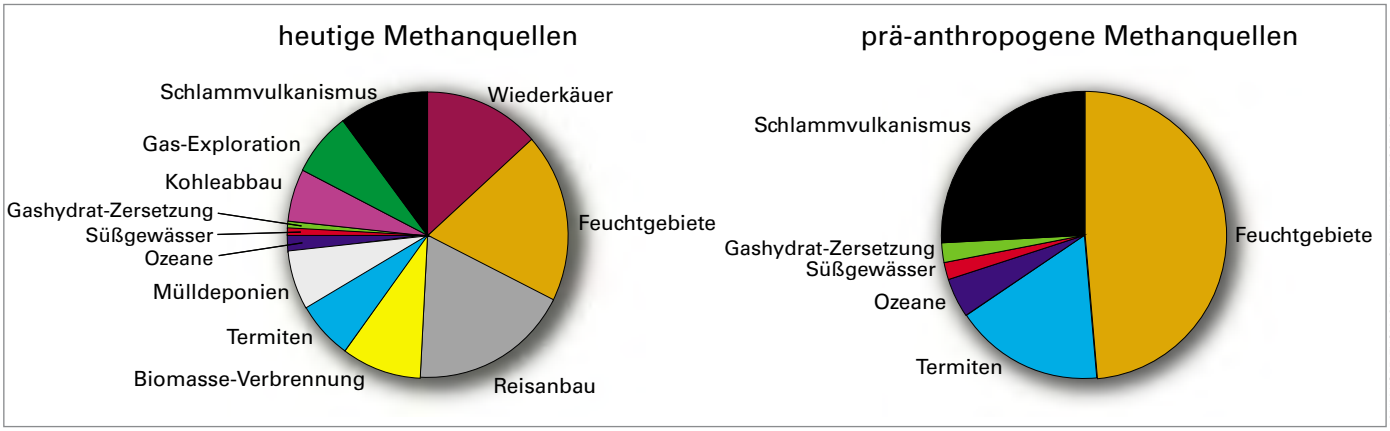
Aber selbst das Entweichen von Gas in Phasen vermeintlicher Ruhe zwischen den Ausbrüchen ist bedeutsam. Methan ist ein hochwirksames Treibhausgas, das Wärmestrahlung sehr effizient an der Erdoberfläche zurückhält. Neuesten Abschätzungen zufolge hat es ein 21-mal höheres globales Erwärmungspotenzial als das bekannteste Treibhausgas Kohlendioxid; in diesem Wert ist seine mittlere Verweildauer von nur zwölf Jahren in der Atmosphäre schon berücksichtigt.

Heute gehen etwa zwei Drittel des jährlichen Methanausstoßes von insgesamt 540 Millionen Tonnen weltweit auf anthropogene Einflüsse wie Landwirtschaft – vor allem Reisanbau und Rinderzucht –, Erdgasexploration, Gewinnung fossiler Brennstoffe, Mülldeponien und Biomasseverbrennung zurück. Doch noch vor tausend Jahren gab es praktisch nur natürliche



ACHIM KOPF / CAROLINE HUGUEN / THOMAS BRAUN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Der Mittelmeerrücken-Akkretionskeil, bei dem sich die Afrikanische Platte unter den europäischen Festlandsockel schiebt, enthält einige hundert Schlammvulkane. Südlich von Kreta werden an kompressiven Störungen viele kleine, kegelförmige Schlammdome (grün) ausgepresst. Der Ausschnitt (oben) zeigt ein Originalsonogramm; schwarz sind die Zonen stärkster Reflexion des ausgesandten Schalls. Sie zeigen Schlammvulkane an, weil deren trümmerhaltiges Material dichter ist als das lockere Sediment daneben.



ACHIM KOPF /THOMAS BRAUN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Auch heute sind Schlammvulkane noch eine wichtige Quelle des Treibhausgases Methan (links). Vor dem Aufkommen menschlicher Aktivitäten war ihr Anteil weitaus größer (rechts). Damals dürften sie das irdische Klima entscheidend mitbeeinflusst haben.

Methanquellen. Dazu zählten die Entgasung von Ozeanen und Frischwasserreservoiren, das Faulen organischen Materials in Feuchtgebieten, die Zersetzung von Gashydraten am Meeresboden und eben Schlammvulkanismus.

Dessen Beitrag habe ich in einer neuen wissenschaftlichen Studie abzuschätzen versucht. Dazu extrapolierte ich die Ergebnisse von Gasemissionsmessungen an ausgesuchten Schlammvulkanen auf deren Gesamtzahl von knapp 2000 Exemplaren weltweit. Bei dieser Abschätzung wurden auch Faktoren berücksichtigt wie die Tatsache, dass am Meeresboden ausgetretenes Methan schon oxidiert werden kann, bevor es die Atmosphäre erreicht. Das Ergebnis dieser Berechnungen war, dass Schlammvulkane etwa 25 Prozent der natürlichen Methanemissionen verursachen. Dieser Ausstoß verteilt sich etwa zu gleichen Teilen auf passive Entgasung in Ruhephasen und Ausbrüche.

Daraus ergibt sich eine enorme Bedeutung von Schlammvulkanen für das Klima der Erde. Die gesamte Methanmenge, die durch menschliche Einflüsse im vergangenen Jahrtausend freigesetzt wurde, entspricht bei vorsichtiger Schätzung einer Schlammvulkantätigkeit von lediglich etwa zwei Millionen Jahren (bei großzügiger Rechnung sogar nur 800 000 Jahren). Nun gibt es auf der Erde seit mindestens 600 Millionen Jahren Plattendrift und höhere Lebewesen, bei deren anaerober Zersetzung Methan entsteht: notwendige Voraussetzungen für Schlammvulkanismus. Dieser hätte demnach – ähnliche Häufigkeit und Emissionsraten vorausgesetzt wie heute – seither fast 300-mal so viel Methan in die Erdatmospäre abgegeben wie der Mensch.

Diese Abschätzung ist zwar mit einigen Unsicherheiten behaftet: Da nur in Einzelfällen Schlammvulkane aus früheren erdgeschichtlichen Epochen erhalten sind, lässt sich eben nicht direkt beweisen, dass sie früher ebenso aktiv waren wie heute. Dennoch scheint ziemlich sicher, dass der Schlammvulkanismus seit langer Zeit zur Klimaentwicklung beigetragen hat.

Mittlerweile machen einige Wissenschaftler sogar einen vermehrten Methanausstoß für die globale Erwärmung am Ende des Paläozäns (vor rund 55 Millionen Jahren) oder während der Zwischeneiszeiten im Verlauf der letzten Jahrmillion verantwortlich. Außerdem kann die Freisetzung von Methan durch sedimentäre Vulkane mit den Kohlendioxid-Emissionen ihrer magmatischen Namensvettern fast mithalten, wenn man nicht nur die Mengen vergleicht, sondern auch die höhere Treibhauswirkung des Methans berücksichtigt.

Lange standen die Schlammdiapire im Abseits der geologischen Forschung. Nachdem ihre Bedeutung für den Stoffkreislauf zwischen Erdkruste und Meer sowie ihr Effekt auf das irdische Klima nun allmählich erkannt wird, ist auch das Interesse an ihnen neu erwacht.

So haben Forscher des Alfred-Wegener-Instituts in Bremerhaven im Jahr 2001 mit dem französischen Forschungsschiff L'Atalante und letzten Sommer mit dem deutschen Forschungseisbrecher Polarstern den Schlammvulkan Håkon Mosby in 1260 Meter Tiefe vor Norwegen aufgesucht und ihn mit dem Tauchboot Victor 6000 aus der Nähe inspiziert. Dabei bilanzierten sie den Methanaustritt und -umsatz am Meeresboden sowie im Wasser und untersuchten die ungewöhnlichen chemosynthetischen Lebensgemeinschaften. Diese und viele ähnliche Unternehmungen werden helfen, den Beitrag der vernachlässigten Geschwister der viel bekannteren Feuerberge zur Dynamik unseres Planeten endlich angemessen zu würdigen. ◁

Achim Kopf ist promovierter Geologe, Privatdozent an der Universität Freiburg und Humboldt-Fellow an der Scripps Institution of Oceanography in La Jolla (Kalifornien). Er hat sich über Schlammvulkanismus habilitiert und kürzlich die umfangreichste wissenschaftliche Abhandlung zum Thema verfasst. In Würdigung seiner herausragenden Arbeiten verlieh ihm die Geologische Vereinigung e. V. den mit 10 000 Euro dotierten Hans-Cloos-Preis 2001, der alljährlich an Nachwuchswissenschaftler vergeben wird.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Literaturhinweise

Über Schlammvulkane und Salzdome. Von A. Gansser in: Vierteljahresschrift der Naturforschenden Gesellschaft Zürich, Bd. 105, S. 1 (1960)

Significance of Mud Volcanism. Von A. J. Kopf in: Reviews of Geophysics, Bd. 40/2, 2002 [DOI 10.1029/2000RG000093]

Extreme Efficiency of Mud Volcanism in Dewatering Accretionary Prisms. Von A. J. Kopf, D. Klaeschen und J. Mascle in: Earth and Planetary Science Letters, Bd. 189/3–4, S. 295 (2001)

The Nature and Hydrogeologic Significance of Mud Diapirs and Diatremes for Accretionary Systems. Von K. M. Brown in: Journal of Geophysical Research, Bd. 95/B6, S. 8969 (1990)

Weblinks zum Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Warum gibt es Großmütter?

Weshalb beim Menschen im Unterschied zu anderen Primaten helfende Großmütter vorkommen, ist umstritten. Familien brachten sie wohl nicht immer Segen – zumindest in einer früheren deutschen Bauernbevölkerung.

Von Eckart Voland und Jan Beise

Kinder wissen, wozu Großmütter da sind: Zum Spielen, Trösten, Verwöhnen. Auch junge Eltern zögern gewöhnlich nicht mit der Antwort: Die Oma hilft, wenn man sie braucht. Anthropologen fällt die Erklärung schwerer. Seit langem rätseln sie darüber, warum beim Menschen die helfende Großmutter existiert.

Sicher wissen die Forscher nur, dass Menschen ein doppelt so hohes Alter erreichen können wie die Menschenaffen. Warum aber gerade Frauen in der zweiten Lebenshälfte unfruchtbar sind, ist umstritten. Schließlich gehen die übrigen physiologischen Funktionen nur sehr langsam zurück, ebenso die Zeugungsfähigkeit von Männern. Manche Forscher vermuten den Zweck der verlängerten menschlichen Lebensspanne tatsächlich in der Großmutter. Dank ihrer Unterstützung würden jüngere Paare mehr Kinder großziehen können. Und zumindest früher konnten Frauen normalerweise den Familien ihrer erwachsenen Söhne oder Töchter erst dann ihre Zeit und Kraft schenken, wenn sie selbst keine weiteren Kinder mehr bekamen.

Aus evolutionsbiologischer Sicht müsste eine Großmutter der nächsten Generation vielerlei Vorteil bringen. Sie müsste auch ein tief begründetes Interesse am Wohlergehen ihrer Enkelkinder zeigen. Schließlich bemisst sich daran letztlich auch ihr eigener Fortpflanzungserfolg. Dass von ihrer Mutter unterstützte jüngere Frauen mehr Kinder zur Welt bringen und dass die Kinder dank der Großmutter besser ernährt werden, haben Anthropologen in einigen traditionellen Wildbeuter- und Ackerbaugesellschaften auch nachgewiesen. Inwieweit dies grundsätzlich für menschliche Familien gilt oder überhaupt für beide Großmütter, haben die Forscher allerdings bisher nicht erfasst. Unsere eigenen Untersuchungen einer historischen norddeutschen Bevölkerung bringen hier einige Überraschungen.

Mit der Großmutter trat auch die Schwiegermutter in die Familie. Kinder lieben Großmütter. Aber nicht jede Schwiegertochter liebt ihre Schwiegermutter – und umgekehrt. Die beiden »können sich nicht riechen«. So umschrieb um 160 vor Christus der römische Komödiendichter Publius Terentius Afer – genannt Terenz – in dem Stück »Hecyra« (»Die Schwiegermutter«) die Spannungen, über die viele Betroffene seit alters her klagen.

Dennoch müssten selbst Schwiegermütter nach der soziobiologischen Evolutionstheorie der jungen Familie zum Segen gereichen. Noch mehr eigene Kinder großzuziehen wäre für eine Frau zwar wahrscheinlich in der Aufrechnung günstiger, als Sohn oder Tochter bei der Kinderpflege zu helfen, doch angesichts der Altersterilität einer Frau lohnt sich der Einsatz für die Enkelkinder durchaus.

Ob solche biologischen Überlegungen generell stimmen, können nur Vergleiche vieler Menschengruppen aus unterschiedlichsten Kulturen zeigen. Erst dann dürfte sich auch herausstellen, wieso es Großmüt-

IN KÜRZE

- Die **Soziobiologie** gilt seit vierzig Jahren als wichtiger Zweig der Verhaltensforschung. Sie untersucht soziale Erscheinungen bei Mensch und Tier auf evolutionstheoretischer Grundlage.
- **Verhaltensstrategien** heißen in der Evolution entstandene, also genetisch beeinflusste, komplexe Verhaltensprogramme. Soziobiologen nehmen an, dass sich auch Menschen abhängig von ihrer Lebenssituation oft nach solchen eher unbewussten Strategien verhalten.
- Der **Fortpflanzungserfolg** ist sozusagen die Währung, auf die es bei der Wahl einer Verhaltensstrategie ankommt. Den höchsten Wert für den Gesamterfolg haben eigene Kinder. Doch auch Kindeskinder und andere sehr nahe Verwandte zählen mit.

ter wirklich gibt. Wie auch bei anderen Fragen über die Evolutionshintergründe menschlichen Verhaltens interessiert Soziobiologen die Variabilität des Phänomens. Sie möchten herausfinden, inwieweit sich der Beitrag von Großmüttern in einzelnen Kulturen und Lebensnischen unterscheidet und welche Folgen dies für ihre Kinder und Enkel hat. Ob ältere Frauen ihre Nachkommen unterstützen, auch auf welche Art und in welchem Umfang sie dies leisten, kann zum Teil von Traditionen, von der wirtschaftlichen Situation oder der Gesellschaftsschicht abhängen. Um die Evolution solchen Verhaltens zu erkennen, müsste man den gemeinsamen Kern herausarbeiten.

Zu diesem Puzzle wollte unsere Arbeitsgruppe ein Stück beitragen. Wir untersuchen Reproduktionsstrategien unserer nahen Vorfahren. Mit dem Begriff Reproduktionsstrategie meinen Soziobiologen unbewusste Entscheidungen – genauer gesagt festgelegte Vorgaben für Handlungsrichtungen –, deren Grundlage in der Evolution entstand. Die Forscher vermuten, dass bestimmte bewährte soziale Verhaltensstrategien, wie sie dies nennen, eine genetische Basis haben.

Kinderreichtum nicht erwünscht

Seit längerem analysieren wir die vormoderne Bevölkerung der Krummhörn, der ostfriesischen Küstenmarsch nordwestlich von Emden. Dazu werten wir Kirchenregister und andere historische Quellen aus. Für das 18. und 19. Jahrhundert haben wir aus ungezählten Einträgen in den Kirchenbüchern zu Geburten, Hochzeiten und Todesfällen individuelle Lebensläufe Tausender von Personen nachgezeichnet. Aus diesen Einzelschicksalen rekonstruierten wir mit massivem Computereinsatz die Geschichten von über 23 000 Familien aus bisher 19 Kirchspielen (siehe Spektrum der Wissenschaft 6/1995, S. 70).

Wir hofften, aus diesen Daten auch etwas über Großeltern und das Schicksal ihrer Kinder und Enkel zu erfahren. Wir erwarteten nichts anderes, als auch für die Altvorderen Ostfrieslands zweifelsfrei das segensreiche Wirken von Großmüttern dokumentieren zu können.

Als Erstes wollten wir wissen, ob die Familien in Pilsum, Pewsum, Rysum und den anderen Dörfern der Krummhörn mehr Kinder bekamen, wenn eine Großmutter zur Stelle war. Wir erfassten dabei zunächst nur, ob eine oder beide Mütter des Paares noch lebten. Unsere Hypothese: Großmütter sollten durch ihren Einsatz die Anzahl der Enkelkinder steigern. Insbesondere sollten sie engere Geburtenabstände ermöglichen, weil sie die junge Frau bei der Alltagsarbeit, wie der Nahrungsbeschaffung und -zubereitung, entlasteten.

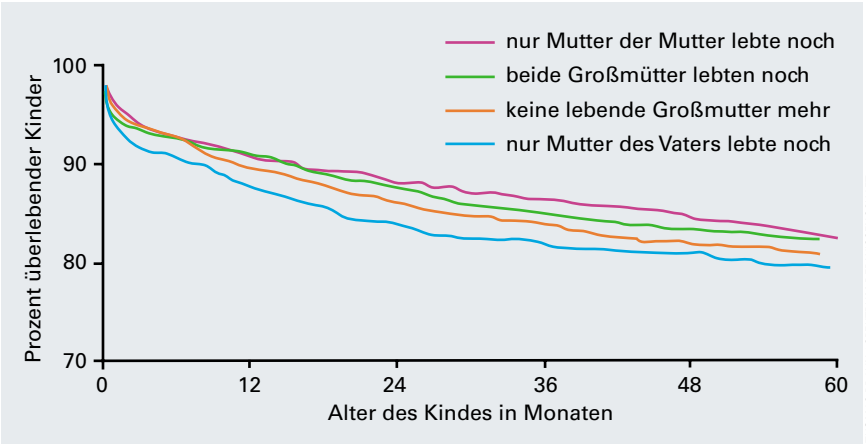
In tropischen Wildbeutergesellschaften betragen die Abstände zwischen den Geburten im Mittel drei bis vier Jahre, bei Schimpansen dagegen fünf bis sechs Jahre. Menschenfrauen stillen ihre Kinder deutlich früher ab, als Schimpansenweibchen dies tun. Dies gelingt ihnen, so die Annahme der Anthropologen, weil die Großmütter ihnen etwa bei der Nahrungsbeschaffung hilfreich zur Seite stehen.

Die Befunde zur Kummhörn waren ernüchternd. In dieser fruchtbaren Küstenmarsch hatte eine Großmutter anscheinend keinen Einfluss darauf, wie rasch hintereinander die Kinder erschienen. Mit und ohne Oma betrugen die Geburtenabstände durchschnittlich knapp drei Jahre.

Zu unserer Überraschung hatten ältere Frauen gleichfalls so gut wie keinen Einfluss darauf, wie viele Enkelkinder geboren wurden. Nur die wenigen Familien mit über vier noch lebenden Kindern bekamen etwas öfter ein weiteres, wenn beide Großmütter noch lebten. Um die Kinderzahl zu begrenzen, haben viele Paare offenbar ver- ▷

STÄDTISCHE GALERIE IM STÄDELSCHEN KUNSTINSTITUT FRANKFURT / URSULA EDELMANN

Sorgsam und liebevoll wacht diese Großmutter über den Schlaf ihrer Enkelin. Hans Thoma (1839–1924) malte die beiden im Jahr 1884.



THOMAS BRAUN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

In den untersuchten Familien Ostfrieslands starben die wenigsten Kinder, wenn nur die Großmutter mütterlicherseits lebte, die meisten, wenn nur die Mutter des Vaters am Leben war.

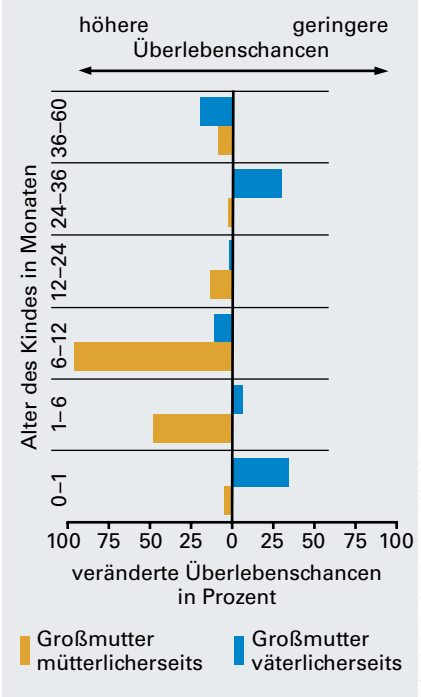
▷ hütet. Soweit die historischen Quellen aufzeigen, hätten die meisten Familien durchaus mehr Kinder bekommen können, und dies wohl auch ohne Unterstützung.

Hatten wir die falsche Frage gestellt? Vielleicht wirkte sich die Hilfe der Großmütter nicht auf die Fruchtbarkeit der Familien aus, sondern auf das Wohlergehen der Enkel – also nicht auf die Anzahl geborener Kinder, sondern darauf, wie viele von ihnen früh starben. Besonders für Krisenzeiten könnte das gegolten haben, wie bei Krankheiten oder in kritischen Lebensabschnitten von Säuglingen und Kleinkindern. Auch die Menschen der Krummhörn hatten mit einer hohen Kindersterblichkeit zu kämpfen. Durchschnittlich rund zwölf Prozent der Säuglinge überlebten das erste Jahr nicht. Das heißt, etwa jedes achte Kind starb vor dem ersten Geburtstag. Fast jedes vierte erlebte seinen fünfzehnten Geburtstag nicht. Half eine Großmutter, dass mehr Kinder groß wurden, etwa indem sie der jungen Familie in besonders kritischen Phasen der ersten Jahre beistand?

Diese These fanden wir in den Daten endlich bestätigt. Wenn beide Großmütter noch lebten, starben die Kinder wirklich etwas seltener als ohne eine Großmutter. Weil wir annahmen, dass zwei Omas besser sein würden als eine, fragten wir als Nächstes nach dem Einfluss von nur einer noch lebenden Großmutter. Dazu entschlüsselten wir die Daten getrennt nach der Großmutter väter- und mütterlicherseits.

Was nun herauskam, hatten wir keinesfalls erwartet: Die höhere Überlebenswahrscheinlichkeit junger Kinder schien in dieser Statistik lediglich auf die Großmütter von mütterlicher Seite zurückzugehen. Mit dieser Oma allein starben sogar noch etwas weniger Kinder als mit beiden Omas (siehe Grafik oben). Lebte aber nur noch die Mutter des Vaters, sank die Überlebenswahrscheinlichkeit eines Kindes bis zum fünften Geburtstag sogar unter den Wert, als wenn es gar keine Großmutter mehr gehabt hätte.

Wohlgemerkt sind dies Durchschnittszahlen aus Tausenden von Familien, und die Verschiebungen der Prozentwerte sind klein. In vielen Einzelfällen mögen die Verhältnisse völlig anders gewesen sein. Wie diese Menschen jeweils miteinander umgingen und wie ihr Alltag aussah, wissen wir natürlich nicht. Doch was könnte der drastische Befund besagen? Warum war es für ein Kind oft besser, gar keine Großmutter mehr zu haben als die von väterlicher Seite? Kümmerten sich die Frauen wirklich weniger gern um die Kinder ihres Sohnes? War die Ursache eventuell eine Schwiegermutter-Schwiegertochter-Dissonanz, die so krass durchschlug? Oder handelte es sich gar um Ausbeutung der Kindesmutter?



THOMAS BRAUN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Die Überlebenschancen Neugeborener sanken im ersten Monat drastisch, wenn die Großmutter väterlicherseits lebte. Lebte die Großmutter mütterlicherseits, stiegen sie besonders im zweiten Lebenshalbjahr.

Auf der Suche nach einer Erklärung prüften wir die einzelnen Altersabschnitte der Kinder. Diese Berechnungen brachten ein klares, auf den ersten Blick aber nicht weniger verblüffendes Muster: Ein erhöhtes Sterberisiko bei vorhandener Großmutter väterlicherseits bestand nur im ersten Lebensmonat. Ohne diese Großmutter starben im ersten Monat rund ein Drittel Säuglinge weniger. Auf tausend Kinder umgerechnet starben ohne eine Großmutter väterlicherseits etwa 38 Säuglinge in den ersten Wochen, dagegen rund 57, wenn sie noch lebte. Auch später erhöhte diese Oma das Sterberisiko eher, als dass sie es verringerte. In den Zahlen schlägt sich dies aber kaum nieder, weil die Sterblichkeit dann insgesamt viel geringer war. Doch im Ganzen drückten diese Effekte die durchschnittlichen Überlebenszahlen bis zum fünften Geburtstag herunter.

Dagegen wirkte sich die Großmutter mütterlicherseits fast durchgehend günstig aus. Im Durchschnitt erlebten von tausend Kindern etwa 126 nicht den ersten Geburtstag. War diese Oma vorhanden, starben im ersten Lebensjahr etwa 93. Am deutlichsten zeigte sich der Effekt in der zweiten Hälfte des ersten Lebensjahres. In diesem Altersabschnitt starben ohne sie fast 34 anstatt etwa 17 von tausend Kindern. Die Großmutter mütterlicherseits half sozusagen mit, allein in diesem Lebensabschnitt etwa jedes zweite Kind zu retten, das sonst gestorben wäre.

Dieses Ergebnis konnte eigentlich nur bedeuten, dass beide Großmütter mit der jungen Familie völlig unterschiedlich gestaltete Kontakte unterhielten. Falls das zutraf, dürfte es keineswegs egal gewesen sein, ob die Großmutter so nah lebte, dass sie die junge Familie beinahe täglich sah, oder ob sie diese nur gelegentlich besuchte.

Wir verglichen also die Sterbewahrscheinlichkeit für Kinder mit einer Oma

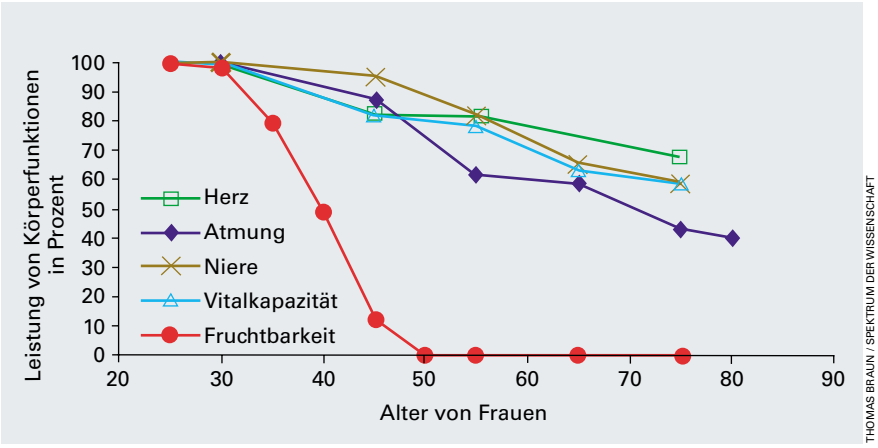
im eigenen Dorf mit der, wenn diese in einer anderen Gemeinde lebte. Den Daten ließ sich nur entnehmen, ob die Oma im selben Ort wohnte. Wann sie auch zum selben Haushalt gehörte, wissen wir leider nicht. Nun bestätigte sich, dass die beschriebenen Effekte beider Art sich abschwächten, wenn die betreffende Großmutter einen anderen Wohnort hatte. Lebte die Mutter der Kindesmutter im selben Ort, half das den Kindern statistisch in beinahe allen untersuchten Altersklassen noch mehr als im Gesamtdurchschnitt.

Noch krasser spitzten sich die Verhältnisse hinsichtlich der anderen Linie zu. Falls die Großmutter väterlicherseits in einem der Nachbardörfer lebte, starben im ersten Monat von den Kindern im Schnitt »nur« etwas über die Hälfte (59 Prozent) mehr als dann, wenn diese Oma schon gestorben war. Wohnte die Mutter des Kindesvaters hingegen im selben Dorf, starben von den Neugeborenen statistisch fast zweieinhalb mal so viele (also 150 Prozent mehr als ohne diese Großmutter).

Die Bilanz einer Großmutter

Der günstige Einfluss einer Großmutter mütterlicherseits auf das Kindeswohl dürfte evolutionspsychologisch einfach zu deuten sein. Im eigenen Interesse unterstützten ältere Frauen ihre verheirateten Töchter, wenn diese Kinder hatten. Auf diese Weise steigerten sie über das Wohl ihrer Enkel letztlich auch ihren eigenen Fortpflanzungserfolg. Wie die Hilfe aussah, wissen wir nicht. Vielleicht nutzte schon kluger Rat aus eigener Erfahrung.

Auffälligerweise half die Anwesenheit dieser Großmutter am stärksten im zweiten Lebenshalbjahr des Kindes, in dem sicherlich viele der Kleinkinder abgestillt wurden. Erfahrungsgemäß ist die Ernährungsumstellung oft nicht einfach und war es in Zeiten ohne vorgefertigte Kindernahrung, Schnuller und Desinfektionsmittel wohl noch weniger.



THOMAS BRAUN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

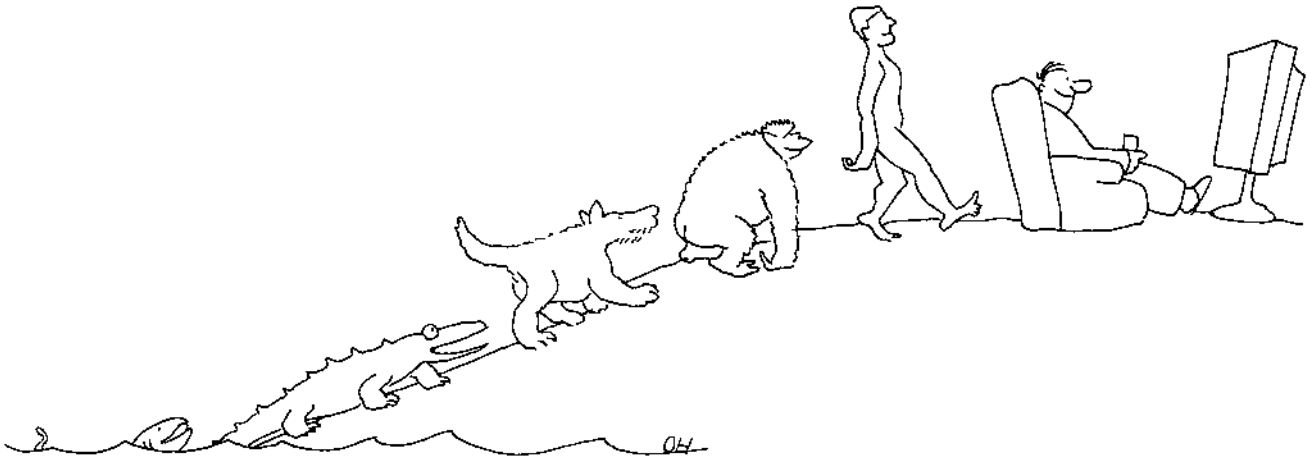
Die Fruchtbarkeit der Frauen fällt aus dem Rahmen. Die meisten physiologischen Funktionen nehmen im Alter langsam ab. Nur die Fortpflanzungsfähigkeit hört in der Lebensmitte auf.

Der Effekt der Großmütter väterlicherseits lässt sich schwerer verstehen. Es scheint gerade so, als ob diese Frauen der jungen Familie eben nicht mit Rat oder Tat zur Seite standen. Zu keiner Zeit in den ersten fünf Lebensjahren der Kinder stiegen deren Überlebenschancen deutlich, wenn nur diese Oma noch lebte. Wir wissen nicht, ob ihre Hilfe nicht erwünscht war oder ihr Rat nicht angenommen wurde, oder ob sie Unterstützung verweigerte.

Nach einer Erklärung verlangt vor allem der erschreckende Befund, dass so viel mehr der Kinder schon im frühesten Säuglingsalter starben, wenn nur noch die Großmutter väterlicherseits lebte und ganz in der Nähe wohnte. Woran diese – lebend geborenen – Säuglinge starben, lässt sich den Quellen nicht zuverlässig entnehmen. Wir haben den Verdacht, dass die offenbar strenge calvinistische Grundhaltung der Mehrheit dieser Bevölkerung einen Einfluss hatte. Wenigstens zwei Deutungen erscheinen in dieser Hinsicht möglich.

Zum einen wäre nahe liegend, als Hintergrund für die so deutlich höhere Sterberate sehr angespannte Schwiegermutter-Schwiegertochter-Verhältnisse anzunehmen. Möglicherweise beeinträchtigten die Missstimmungen oft schon die Schwangerschaft oder den Geburtsverlauf, sodass die werdenden Mütter unter der hohen psychischen Belastung überdurchschnittlich oft weniger lebensfähige Kinder zur Welt brachten. Vielleicht kamen betroffene junge Frauen auch nach der Niederkunft selbst langsamer wieder zu Kräften und es fiel ihnen deswegen schwerer, den Säugling zu nähren und zu versorgen.

Aus soziobiologischer Sicht erscheint die erhöhte Säuglingssterblichkeit allerdings wenig plausibel. Selbst wenn Schwiegermutter und -tochter sich schlecht vertrugen, müsste eine Großmutter eigentlich trotzdem ihre Enkel lieben und um sie Sorge tragen. Verhaltensprogramme, die den Kindern des Sohnes schaden, dürften nicht entstanden sein. ▷



▷ Allerdings könnten die Krummhörner Schwiegermütter Opfer eines in Maßen durchaus sinnvollen Misstrauens gegen die Schwiegertöchter geworden sein. Der Satz »Pater semper incertus« (frei übersetzt: »Über die Vaterschaft bleibt immer ein Rest von Unsicherheit«) bewährt sich auch in vielen soziobiologischen Studien. Meist ziehen die Forscher ihn allerdings heran, um eine ambivalente Haltung von Männern gegenüber Frau und Kindern zu deuten. In der Krummhörn könnte aus solcher Unsicherheit gespeister Argwohn die Einstellung von Schwiegermüttern zu ihren Schwiegertöchtern beeinträchtigt haben. Schließlich wäre es evolutionsbiologisch gesehen Verschwendung, sich für nicht genetisch verwandte Säuglinge abzumühen. Außerdem handelten die Frauen auch im Interesse ihres erwachsenen Sohnes, wenn sie sich nicht zu sehr für Kinder einsetzten, die vielleicht doch nicht seine waren.

In diesem Sinne mögen Schwiegermütter der vormodernen Krummhörn auf die jungen Frauen generell Druck ausgeübt haben, um eheliche Treue zu erzwingen. Kamen ihnen gar Zweifel an der Tugendhaftigkeit der Schwiegertochter, benahmen sie sich wohl noch härter. Vielleicht hielten sie viele der früh gestorbenen Kinder gar nicht für eigene Enkel, ob zu Recht oder nicht. Auffällig ist, dass die Sterberate im späteren Säuglings- und im Kleinkindalter unter ihrem Einfluss nicht mehr höher war als im Durchschnitt. Das wirkt, als hätten sich die Familienbeziehungen später entspannt.

Die böse Schwiegermutter

Sofern diese Erklärung zutrifft, hätten die »mobbenden« Schwiegermütter mit ihrem strengen Regiment gewaltig überzogen. In dieser calvinistischen Bevölkerung dürfte man es mit der Ehemoral sehr genau genommen haben. Sicherlich fühlten sich gerade die älteren Frauen dafür zuständig, dass diese Moral in der eigenen Familie befolgt wurde. Wie überall mögen Seitensprünge vorgekommen sein, doch waren dies sicherlich Ausnahmen. Vergleichbar der Entwicklung in anderen Gegenden Europas dürften sich die Sitten erst im ausgehenden 19. Jahrhundert ein wenig gelockert haben.

In ihrer Härte gingen die Großmütter väterlicherseits das Risiko ein, auch leibliche Enkel zu schädigen. War sozusagen der evolutionär eingebaute »Schwiegertochter-Überwachungssensor«, der im Falle ehelicher Untreue von Schwiegerkindern sofort Alarm meldet, aufgrund der kulturellen Bedingungen überscharf eingestellt? Uns erscheint dies möglich. Wenn denn ein solcher Melder für Fehlverhalten existiert, hätte die überaus strenge calvinistisch geprägte Sexualmoral jener Zeit zu häufigem Fehlalarm beigetragen oder sogar einen Daueralarm gegeben, der nur Schaden anrichtete. Von Seiten der Soziobiologie müsste man fragen, was für eine ältere Frau letztlich ungünstiger ist: Gelegentlich ein fremdes Kind jahrelang mit durchfüttern zu helfen, oder ein eigenes Enkelkind zu verlieren – wo doch vermutlich in wenigen Jahren das nächste zur Welt kommen wird. In der Krummhörn scheint dieses Gleichgewicht nicht mehr ausbalanciert gewesen zu sein.

Noch eine zweite Erklärung für die erhöhte Säuglingssterblichkeit im ersten Lebensmonat erscheint möglich oder könnte die erste ergänzen. Auch sie stützt sich auf Verhaltensstrategien, die evolutionstheoretisch plausibel sind. Nach dieser These wären Schwiegermütter der Strategie gefolgt, ihre Schwiegertöchter im Interesse der eigenen Familie vor allem auszubeuten, also über Gebühr zur Arbeit in Haus und Garten anzutreiben.

Schonung der Schwiegertochter wäre dann nicht angesagt gewesen, auch nicht in einer Schwangerschaft oder nach einer Geburt. Sonderlich tragisch mag es nicht aufgenommen worden sein, wenn die Ar-

BILDARCHIV FOTO MARBURG / GEORG KLOTZ

So selbstlos diese hessische Bäuerin mit ihrer Enkelin anmutet: Großmütter kümmern sich um ihre Kindeskinder auch aus Eigeninteresse.

beitslast manchmal die Kraft der jungen Frau überstieg und dies auch einmal das Leben eines neugeborenen Enkelkindes forderte. Gewöhnlich war bald weiterer Nachwuchs zu erwarten. Möglicherweise wurde Fruchtbarkeit genauso selbstverständlich eingefordert wie die Arbeitsleistung. Und auch Schwiegertöchter waren ersetzbar. So zynisch dies alles klingt – in der sozialen Evolution des Menschen spielte die Verfolgung von Einzel- und Familieninteressen immer eine große Rolle.

Großmutterdasein als Kompromiss

Leider gibt es hierzu bisher keine Vergleichsstudien aus anderen Bevölkerungen oder sogar anderen Kulturen. Darum können wir noch nicht sagen, in welchem Maße diese Deutungen zutreffen oder vielleicht eine noch andere. Eine amerikanische Arbeit über das Dorfleben im Japan des 18. und 19. Jahrhunderts weist zumindest ebenfalls auf, dass die Großmütter väterlicherseits eher schadeten als nützten. Frauen lebten dort länger, wenn die Schwiegermutter früh gestorben war.

Als der amerikanische Zoologe George Williams vor fast fünfzig Jahren das Großmutter-Phänomen zu erklären versuchte, überlegte er, dass die Altersterilität von Frauen eine biologische Anpassung sei. Sie helfe, den Lebensreproduktionserfolg zu steigern, der sich – neben der Zahl der überlebenden Kinder – auch aus der Anzahl weiterer Nachfahren bemisst. Weil Geburten im Alter zunehmend riskanter seien, würde es sich für eine Frau von einem bestimmten Zeitpunkt an mehr lohnen, ihre Lebenskraft für die schon vorhandenen eigenen Kinder und deren Nachwuchs einzusetzen. Darum sei die Menopause entstanden, während Männer bis ins Alter Kinder zeugen können.

Heutige Evolutionstheoretiker zweifeln an Williams' »Großmutter-Hypothese«. Nach allen Modellen bringen eigene Kinder stets den größeren Fortpflanzungsgewinn. Die Forscher vermuten, dass es einfach nicht möglich war, wesentlich mehr Eizellen anzulegen. Die Eierstöcke werden schon vor der Geburt mit ihrem Vorrat ausgerüstet. Vielleicht stellt der Einsatz von Großmüttern für ihre Enkel und erwachsenen Kinder nur einen Kompromiss dar, sodass Frauen ihren Lebensreproduktionserfolg nach der Menopause indirekt doch noch etwas steigern können.

Auch wenn die helfende Großmutter eine Notlösung sein mag (und nicht der Anlass dafür, dass der Mensch so viel älter werden kann als seine Vorfahren, wie die amerikanische Anthropologin Kirsten Hawkes behauptet): Nach der Theorie sollte eine ältere Frau normalerweise das Wohlergehen der Familien ihrer Kinder stärken. Das hatten wir auch für die Krummhörn erwartet. Allenfalls könnte eine Großmutter sich neutral verhalten, doch schaden dürfte sie nicht.

Die Ergebnisse lehren uns etwas anderes. Immer vorausgesetzt, unsere Annahmen zu den Ursachen der Sterblichkeitszahlen treffen zu: Uneingeschränkt unterstützten die Frauen offenbar nur die Familien von Töchtern. Im Falle der Söhne dagegen übten sie nicht nur Zurückhaltung, sondern oft störten sie sogar. Wieweit beides tief wurzelnde, weltweit verbreitete menschliche Verhaltensstrategien sind, müssen weitere Studien klären. Möglicherweise handelt es sich um ein psychisches Muster, das nur in der abgelegenen ostfriesischen Marsch unter den damaligen kulturellen Voraussetzungen auftrat.

Doch genauso könnten die Befunde von der Krummhörn sozusagen die motivationale Ausstattung von Großmüttern und Schwiegermüttern überhaupt widerspiegeln. Dann wäre zu prüfen, welche Beweggründe ihr Verhalten vorrangig bestimmen. Zielt es darauf ab, Schwiegertöchter auszunutzen, also sowohl deren volle Arbeitskraft als auch deren Gebärfähigkeit einzufordern? Oder folgt es eher dem Motto: In der Familie von Töchtern darfst du unbegrenzt helfen, in der von Söhnen nur bedingt und mit Vorbehalt.

Was besagt dies über die Bedeutung der Großmutter für die Menschenevolution? Hätten ältere Frauen bei ihren Kindeskindern in der Gesamtbilanz mehr Schaden als Nutzen angerichtet, dann hätte die Evolution wahrscheinlich einer Verlängerung der Lebensspanne über die fruchtbare Zeit hinaus entgegengewirkt.

Dennoch passen einige Vorstellungen und Befunde bisher nicht zusammen. Viele Anthropologen glauben, dass bei den eiszeitlichen Wildbeutern der vergangenen Jahrzehntausende die Männer in der angestammten Gemeinschaft blieben, während die Frauen zu einer anderen Gruppe wechseln mussten. Dort konnte die eigene Mutter sie nicht unterstützen. Falls schon die Vorfahren des Menschen ähnliche soziale Regeln befolgten wie die Frauen der Krummhörn, kann seine lange Lebensspanne nicht den hilfreichen Großmüttern von Mutterseite zu verdanken sein. Aber vielleicht irren sich die Anthropologen in dieser Sache. ◁

Eckart Voland ist Anthropologe und Soziobiologe. Er hat an der Universität Gießen eine Professur für Philosophie der Biowissenschaften. **Jan Beise** hat an der Universität Gießen in Biologie promoviert. Er arbeitet am Max-Planck-Institut für demographische Forschung in Rostock.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Literaturhinweise

Opposite Effects of Maternal and Paternal Grandmothers on Infant Survival in Historical Krummhörn. Von Eckart Voland und Jan Beise in: Behavioral Ecology and Sociobiology, Bd. 52, S. 435, 2002.

A Multilevel Event History Analysis of the Effects of Grandmothers in Child Mortality in a Historical German Population (Krummhörn, Ostfriesland, 1720–1874). Von Jan Beise und Eckart Voland in: Demographic Reasearch, Bd. 7, Article 13, 2002.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Kreiselsysteme

Von Mark Fischetti und Bernhard Gerl

Kreisel erfreuen nicht nur Kinder, sie halten auch Flugzeuge in der Luft und Schiffe auf Kurs, stabilisieren Satelliten und unterstützen Navigationssysteme im Automobil (Spektrum der Wissenschaft 9/2002, S. 86). Denn so einfach das Spielzeug wirken mag, seine Bewegungen in einem Kreiselkompass sind komplex. Dort wird seine Drehachse durch mehrere Lager unterstützt und kann sich im Raum je nach einwirkenden Kräften neu orientieren.

Im einfachsten Fall wirkt auf den Kreisel keine äußere Kraft ein, lediglich die Reibung an Lager und Luft muss durch einen Antrieb kompensiert werden. Dann bleibt sein Drehimpuls nach Betrag und Richtung konstant und damit auch die Lage der Rotationsachse. Ein »Gyroskop« (nach griechisch *gyros* für »Kreis«) vermag deshalb auch im Orbit um die Erde, also bei vernachlässigbarer Schwerkraft, die Ausrichtung eines Satelliten zu stabilisieren. Dazu wird jede Abweichung von der Kreiselrotationsachse gemessen, elektronisch ausgewertet und über ein Gastriebwerk korrigiert.

Wird ein sich drehender Kreisel angestoßen, fällt er nicht um, denn die äußere Kraft erzeugt nur einen zusätzlichen Drehimpuls, der sich zu dem der Ausgangsrotation addiert. Das Kinderspielzeug veranschaulicht den Effekt: Gibt man dem Kreisel an der Spitze einen Stoß, beginnt er um die ursprüngliche Rotationsachse zu kreisen – er präzediert. Ist die auslenkende Energie verbraucht, die Ausgangsdrehung aber noch erhalten, richtet er sich wieder auf.

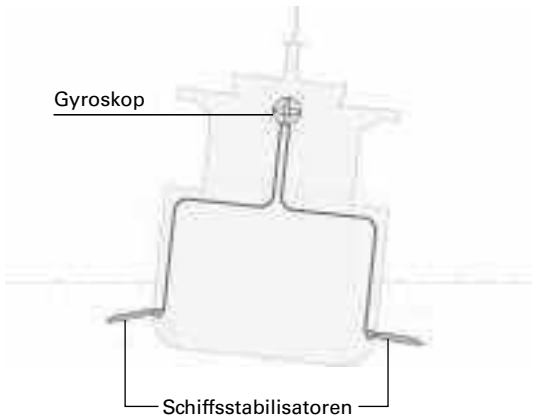
Dieses Phänomen versuchten Schiffsbauingenieure Mitte des 20. Jahrhunderts zu nutzen: Tonnenschwere motorgetriebene Riesengyroskope sollten Schiffe bei starkem Seegang immer wieder aufrichten. Leider gelang es nicht, die dabei auftretenden gewaltigen Kräfte auf den gesamten Schiffsrumpf zu übertragen. Heute steuern Kreiselsysteme stabilisierende Ruder etwa in Schiffsmitte, die ein- und ausgefahren werden (siehe Grafik unten).

Gyroskope sind auch Teil der Autopiloten im Luftverkehr: Ein Kreisel präzediert, sobald die Flugzeugflügel kippen; Instrumente messen den Winkel. Ein zweites Gyroskop ermittelt die Neigung der Maschine zwischen Heck und Cockpit. Zum Autopiloten fehlen dann nur noch Beschleunigungsmesser, um die Geschwindigkeit zu bestimmen. Neben den mechanischen Kreiselsystemen werden seit den 1980er Jahren auch optische Gyroskope entwickelt. Sie arbeiten genauer, sind kleiner und leichter. Mittlerweile kosten solche Geräte nur noch wenige tausend Euro, darum setzen sie sich in der Luftfahrt mehr und mehr durch. In der Raumfahrt vertraut man stattdessen auf die erprobten und zuverlässigen mechanischen Systeme. Der Ausfall eines Gyroskops im Hubbleteleskop hat gezeigt, wie leicht ein teures Prestigeprojekt an einer defekten Steuerung scheitern kann.

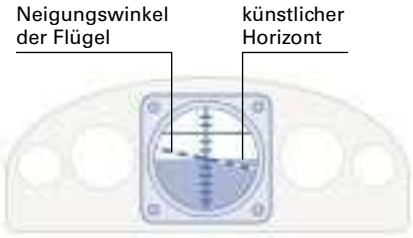
Nur etwa zwanzig Euro kosten Mikrogyroskope (Bild rechts) oder Gierratensensoren aus Silizium. Zwar zeigen sie Lageveränderungen nicht so präzise an wie ihre großen Brüder, dafür lassen sie sich wie integrierte Schaltkreise in Massen fertigen. Automobilhersteller nutzen sie für Steuerungen, die das Schleudern verhindern sollen (ESP, elektronisches Stabilitätsprogramm), und für Navigationssysteme, bei denen die Drehbewegung des Fahrzeugs nur als zusätzliche Information benötigt wird. ◁

Mark Fischetti ist Redakteur von »Scientific American«, **Bernhard Gerl** arbeitet als Fachautor in Regensburg.

Stößt man einen sich drehenden Kreisel kurz an, beginnt er, um die ursprüngliche Drehachse zu kreisen. Diese Präzession verhindert ein Umkippen.



Gyroskope messen das Rollen eines Schiffes. Gegebenenfalls werden seitliche Ruder als Gegenmaßnahme ausgefahren.



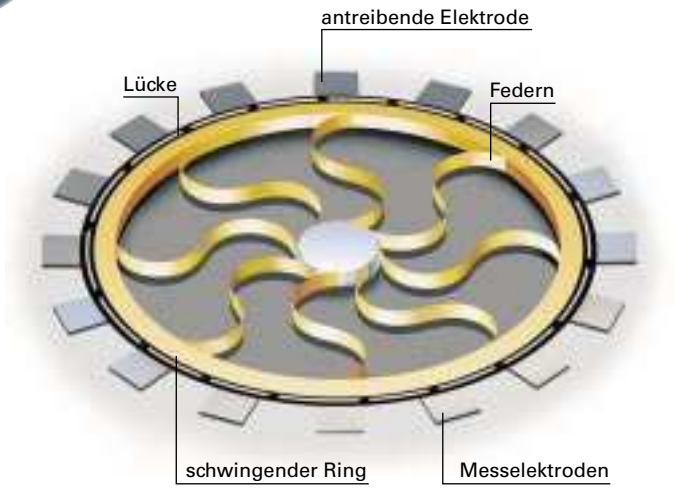
Der Neigungswinkel eines Flugzeugs senkrecht zu seiner Längsachse wird mit Kreiseln gemessen und in Bezug auf einen künstlichen Horizont dargestellt.

WUSSTEN SIE SCHON?

Reibung und Temperaturschwankungen verfälschen die Messergebnisse der Gyroskope. Bei Geräten für Antiblockiersysteme betragen die **systematischen Fehler** bis zu 3600 Grad pro Stunde, allerdings benötigen diese Kreisel nur wenige Sekunden, um ein Fahrzeug zu stabilisieren. Die Gyroskope amerikanischer Lenkbomben beispielsweise sind mit etwa einem Grad pro Stunde sehr viel genauer. Die besten heute erhältlichen Systeme messen sogar auf weniger als 0,01 Grad pro Stunde exakt. Ein damit ausgestatteter Flugkörper würde nach einem einstündigen Flug ohne sonstige Korrekturen keine zwei Kilometer weit von seinem ursprünglichen Ziel einschlagen.

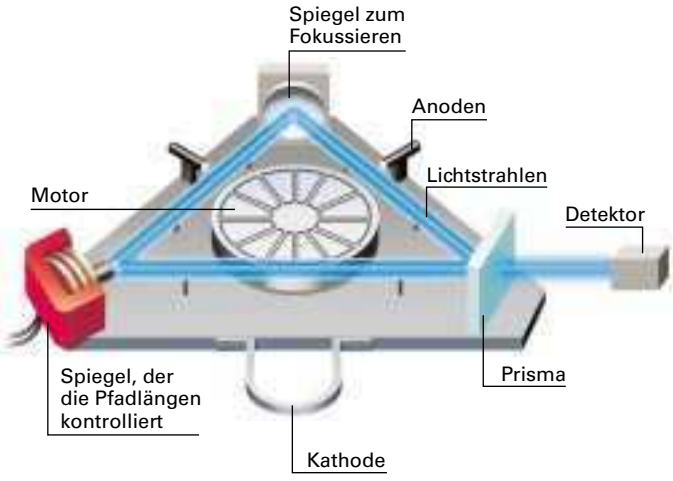
Der Amerikaner Elmer Sperry erhielt 1908 ein Patent für das erste technisch nutzbare Gyroskop. Sechs Jahre später demonstrierte sein Sohn bei der Flugschau in Paris einen kreiselgestützten **Flugzeugstabilisator**: Zum Erstaunen der Preisrichter nahm er seine Hände vom Steuer seines Doppeldeckers, während ein Mechaniker auf den Flügeln hin- und herging. Vater und Sohn entwarfen später einen »Automatischen Piloten«, der Wiley Post im Jahr 1933 half, als Erster allein um die Welt zu fliegen.

ALLE ILLUSTRATIONEN VON GEORGE RETSECK



Mikrogyroskop

Farokh Ayazi vom Georgia Institute of Technology in Atlanta (US-Bundesstaat Georgia), hat ein mikromechanisches Ringgyroskop aus Silizium entwickelt. Ein schwingender Ring ist darin an frei beweglichen Stützfedern aufgehängt, die wiederum in der Mitte an einem starren Stab befestigt sind. Antriebselektroden versetzen den Ring elektrostatisch in Schwingung, Messelektroden überwachen das entstehende Muster. Das wird gestört, wenn eine äußere Kraft den Ring um seine Achse dreht. Aus der Art und der Stärke der Störung lassen sich Richtung und Geschwindigkeit der Rotation ableiten.



Ringlasergyroskop

In einem Ringlasergyroskop regen zwei Anoden und eine Kathode ein Gas an, zwei Lichtwellen gleicher Frequenz in entgegengesetzte Richtungen auszusenden. Wenn die Lichtwellen den Detektor erreichen, überlagern sie sich und es entsteht ein Beugungsmuster. Dazu sollte permanent ein kleiner Phasenunterschied vorhanden sein, deshalb versetzt ein Motor die Anordnung leicht in Schwingung. Wird der Ring von außen gedreht, hat eine der beiden Lichtwellen einen etwas weiteren Weg, und das Interferenzmuster verändert sich in charakteristischer Weise.

Die Identität der Quanten

Die Quantenphysik vermag grundlegende Naturvorgänge äußerst erfolgreich zu beschreiben, aber ihre Interpretation bleibt seit Max Planck umstritten. Eine neue Deutung führt das seltsame Verhalten der Quantenobjekte darauf zurück, dass gleichartige Teilchen im Mikrokosmos vollkommen identisch und ununterscheidbar sind.

Von Peter Pesic

Die Quantenmechanik bildet das Herzstück der modernen Physik. Sie ist der Ariadnefaden im Labyrinth der Atome und Kerne; erst sie erklärt die Stabilität der Materie. Dennoch bleibt die Quantentheorie rätselhaft, denn ihre Grundannahmen erscheinen verwirrend: Alles ist Welle und auch Teilchen; überall herrschen Ungewissheit und Wahrscheinlichkeit. Noch nach hundert Jahren sind Experten und Laien gleichermaßen ratlos. Albert Einstein nannte die Quantentheorie »spukhaft« und versuchte sie zu überwinden. Paul Dirac glaubte, sie sei mit Worten überhaupt nicht angemessen zu erklären, und darum seien die Physiker so stark auf die abstrakte mathematische Struktur der Theorie angewiesen. Doch selbst ein herausragender Physiker wie Freeman Dyson meinte, wer mühsam gelernt habe, die formale Sprache der Quantentheorie zu beherrschen, könne höchstens sagen: »Ich verstehe jetzt, dass es nichts zu verstehen gibt«. Auch Richard Feynman, ein Meister im Finden einfacher Bilder für komplexe Ideen, gab sich geschlagen. Nachdem er in seinen berühmten Physikvorlesungen die Grundprinzipien der Quantentheorie zusammengefasst hatte, bekannte er: »Man könnte noch immer fragen: ›Wie funktioniert es? Welche Maschinerie steckt hinter dem Gesetz?‹ Niemand hat irgendeine Maschinerie hinter dem Gesetz gefunden. Niemand kann mehr ›erklären‹ als das, was wir eben ›erklärt‹ haben. Niemand wird Ihnen eine tiefere Darstellung der Situation liefern. Wir haben keine Ahnung von einem grundlegenderen Mechanismus, aus dem diese Resultate abgeleitet werden könnten.«

An der Schwierigkeit dieser Theorie, die trotz ihres bizarren Charakters jeden experimentellen Test glänzend bestanden hat, führt kein Weg vorbei. Doch vielleicht gibt es einen Blickwinkel, unter dem ihre Seltsamkeit klarer sichtbar wird. Seit zwanzig Jahren untersuche ich die Bedeutung von Identität und Individualität für die Geschichte und die Grundlagen der Quantenmechanik. Dabei bin ich zu folgendem Schluss gekommen: Im Mittelpunkt der Quantentheorie steht die radikale Annahme, dass Elementarteilchen keine Individualität besitzen. Ihre Identitäten verschmelzen – und dadurch kommt die seltsame Welt der Quantenphänomene zu Stande.

Gewiss stellt diese Quanten-Identität seit langem einen allgemein akzeptierten Aspekt der Theorie dar, der wesentlich zum Verständnis der chemischen Bindung und der Struktur der Elemente beigetragen hat. Doch sah man darin die Folge anderer, abstrakterer Annahmen. Ich möchte die Geschichte andersherum erzählen: Bei mir steht die Quanten-Identität ganz am Anfang. In Fachartikeln habe ich für diesen Standpunkt mathematische Argumente angeführt; hier werde ich einige allgemei-

MICHAEL FREEMAN / CORBIS

Der japanische Shinto-Tempel bei Ise bewahrt seit 2000 Jahren seine ursprüngliche Gestalt, weil die Gebäude aus Zypressenholz alle zwanzig Jahre komplett rekonstruiert werden. Der Tempel wirft eine philosophische Frage auf, die schon die alten Griechen beschäftigte: Wann verliert ein immer wieder erneuertes Objekt seine ursprüngliche Identität? Mit dem Problem der Identität von Quantenteilchen gewinnt die alte Frage überraschende Aktualität.

nere Betrachtungen anstellen, um meine Behauptung zu stützen, dass die Seltsamkeit der Quantenmechanik sich am einfachsten als eine Konsequenz der Quanten-Identität erklären lässt.

Um eine neue Sicht der Quantentheorie zu gewinnen, geht man am besten vom Begriff der Individualität aus, denn er ist für Philosophie und Physik ein besonders schwieriges Problem, seit die alten Griechen erstmals über Atome spekulierten. Für Aristoteles war die Individualität grundlegend – ob für Personen, Objekte oder Atome. Dennoch hielt er den Begriff Individualität für weniger wichtig als die Mitgliedschaft in einer Spezies oder Gattung.

Spätere Philosophen betrachteten das Wesen der Individualität in völlig neuem Licht. Im 17. Jahrhundert argumentierte Gottfried Wilhelm Leibniz, zwei Blätter könnten niemals exakt gleich sein, selbst wenn sie von demselben Baum stammten. Nach seiner Überzeugung spiegelt diese Einzigartigkeit nicht irgendeine eigenständige Individualität des Blattes an sich wider, sondern die unterschiedliche Geschichte und den unterschiedlichen Standort jedes Blattes im gesamten Universum. Leibniz meinte, ein vernünftiger Gott würde identische Individuen nicht zulassen, denn wie könnte er eines von ihnen hier und das andere dort platzieren, wenn er sie nicht zu unterscheiden vermöchte?

Leibniz war darum überzeugt, individuelle Einzigartigkeit widerspreche der Existenz anonymer Atome. Sein Zeitgenosse Isaac Newton befürwortete zwar die Realität von Atomen, behandelte aber jedes als unterscheidbar. Für Newton ist der Unterschied zwischen der Individualität zweier Partikel so ausgeprägt, dass sie unmöglich zu verwechseln sind. Doch bei der Anwendung der Newton'schen Mechanik auf die Materie trat ein radikal anderer Aspekt der Realität zu Tage: die Kräfte zwischen Objekten. Schon Newton selbst mutmaßte, dass die Schwerkraft über riesige Entfernungen nicht direkt wirkt, sondern durch »die Vermittlung von etwas anderem, das nicht materiell ist«. Fast zwei Jahrhunderte später folgte Michael Faraday einem ähnlichen Gedankengang, als er Elektrizität und Magnetismus mittels so genannter Kraftlinien oder Felder beschrieb. Für ihn stand nicht mehr die Materie im Mittelpunkt der Physik; Kraftlinien bildeten die eigentliche Realität.

Faraday erweiterte diesen Begriff auf die unsichtbaren Felder, die dem sichtbaren Licht – das er als Wellen in den Kraftlinien interpretierte – zu Grunde liegen. Er war zutiefst überrascht, dass diese Vibrationen nicht an einem Ort verharren: Ruhende Ladungen oder Magnete sind von stationären Feldern umgeben, aber wenn diese Quellen sich beschleunigt bewegen, lösen ihre Felder sich ab und pflanzen sich als Lichtwellen durch den grenzenlosen Raum fort. Kurz zuvor hatte Thomas Young mit seinen berühmten Brechungsexperimenten gezeigt, dass Licht in der Tat aus Wellen besteht. Das Licht in Youngs Apparat konnte nur deshalb Interferenzen zeigen, weil Wellen nicht materielle Objekte sind, sondern Prozesse; darum sind sie austauschbar und können räumlich und zeitlich zusammenfallen.

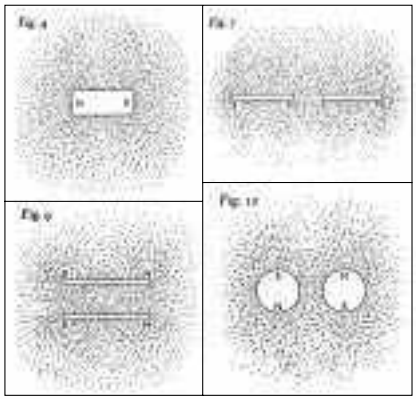
Das königliche Eichsiegel

Wie Faraday erkannte, rufen Atome – ob ruhend oder bewegt – Felder hervor, die voneinander völlig ununterscheidbar sind. Diese Ansicht hat Konsequenzen für die Individualität der Atome selbst, obwohl Faraday bei all seiner Radikalität noch nicht so weit gehen wollte. Wenn Ladung und Materie eigentlich nur als umgangssprachliche Bezeichnungen für die Dichte von an sich ununterscheidbaren Feldlinien existieren, dann sind materielle Partikel in Wirklichkeit ebenso wenig unterscheidbar. Faradays Vision einer Welt von Feldern ▷

IN KÜRZE

- Die Quantentheorie weicht in zentralen Punkten von der klassischen Physik Newtons und Einsteins ab:
- **Welle-Teilchen-Dualismus:** Quantenobjekte lassen sich nur vollständig beschreiben, wenn sie bald als Welle, bald als Teilchen betrachtet werden.
- **Nichtlokalität:** Zwei Quantenteilchen können über makroskopische Entfernungen hinweg »verschränkt« sein und ein untrennbares Quantenobjekt bilden.
- **Indeterminismus:** Die Gesetze der Quantenphysik erlauben keine Vorhersage eindeutiger Messresultate, sondern treffen nur statistische Aussagen über beobachtbare Größen.
- All diese seltsamen Eigenschaften der Theorie lassen sich – so der Autor – auf die so genannte **Quanten-Identität** zurückführen: Teilchen derselben Art verfügen über keinerlei Individualität. Ob Lichtquanten, Neutronen oder Atome – sie sind jeweils absolut ununterscheidbar.

AIP / EMILIO SEGRÈ VISUAL ARCHIVES



Anfang des 19. Jahrhunderts führte der englische Physiker Michael Faraday bahnbrechende Experimente zum Elektromagnetismus in seinem Labor an der Royal Institution in London aus (oben). Mit Eisenfeilspänen machte er die Feldlinien verschiedener Magnete sichtbar (links). Da Felder keine Individualität besitzen, wurde denkbar, dass auch Teilchen ohne Individualität existieren können.

▷ macht die Individualität undurchdringlicher Teilchen fragwürdig.

Mit Faradays Arbeit begann das bis heute andauernde Wechselspiel zwischen Feldern und Teilchen. Einige Jahrzehnte zuvor hatte die Entwicklung der Atomtheorie zu einem entscheidenden Fortschritt geführt: Die Atome büßten ihre Individualität ein. Schon im Jahre 1800 hatte John Dalton den Schluss gezogen, dass alle Atome des Wasserstoffs in ihren beobachteten Eigenschaften exakt übereinstimmen müssen; andernfalls wäre der Wasserstoff kein eigenes Element, sondern eine Ansammlung unterschiedlicher »Wasserstoffe«.

Auch Faradays jüngerer Kollege James Clerk Maxwell argumentierte, alle Moleküle seien absolut identisch, »ob sie auf der Erde, in der Sonne oder den Fixsternen gefunden werden«. Maxwell konnte diese Folgerung aus der Tatsache ziehen, dass auf der Erde dieselben Spektralmuster beobachtet wurden wie im Licht weit entfernter Sterne. Wie die Spektren dieser Sterne zudem zeigten, hatten die Atome schon zu der weit zurückliegenden Zeit, als sie das Licht emittierten, dieselben Eigenschaften. Maxwell schloss daraus, jedes Atom sei mit einem »königlichen Eichsiegel« versehen, und dieser Einheitsstempel verleihe ihm den »wesentlichen Charakter eines Manufaktur-Artikels«.

Spätere Experimente zeigten andere Formen solcher Eichstempel, beginnend mit der Entdeckung der Kathodenstrahlen; diese leuchtenden elektrischen Entladungen in evakuierten Glasgefäßen waren Vorboten heutiger Fernsehröhren. Im Jahre 1897 erzeugte J. J. Thomson erstmals gekrümmte Kathodenstrahlen, indem er sie durch gekreuzte elektrische und magnetische Felder führte. Wie er herausfand, hatte ihr Verhältnis von Ladung zu Masse einen einzigen universellen Wert; das war leicht dadurch zu erklären, dass Kathodenstrahlen eigentlich Ströme von Teilchen sind – die wir heute Elektronen nennen –, deren jedes dieselbe Ladung und Masse hat. Zwei Jahre später fand er auch identische Werte für die Partikel, die das Licht beim so genannten photoelektrischen Effekt aus einer Metallplatte freisetzt. Thomson nannte beide »Korpuskeln«, um ihren Teilchencharakter zu betonen.

Thomsons Experimente mit Elektronen stützten zwar die Vorstellung von unteilbaren Einheiten der Materie, befassten sich aber nicht direkt mit ihrer Individualität. Doch diese Frage tauchte ungefähr zur selben Zeit in einem anderen Gebiet der Physik auf, der Thermodynamik. Im Prinzip verfolgt die Newton'sche Dynamik die Bahn jedes einzelnen Teilchens. Um die riesige Anzahl von Atomen in gewöhnlichen Objekten zu behandeln, entwickelten Ludwig Boltzmann und andere Physiker im 19. Jahrhundert die statistische Mechanik. Dennoch hielt Boltzmann daran fest, dass die Kontinuität und Unterscheidbarkeit jeder Teilchenbahn »das erste fundamentale Prinzip« der Mechanik sei. Hier geriet die wesentliche Gleichheit der Atome in Konflikt mit dem individuellen Determinismus der Newton'schen Mechanik.

Plancks »Akt der Verzweiflung«

Im Rückblick erkennt man, dass die Krise im Jahre 1900 ausbrach, als Max Plancks Arbeit die Bedeutung der Individualität stillschweigend veränderte. Planck versuchte, die reversiblen Prinzipien der Newton'schen Physik mit den irreversiblen Gesetzen der Thermodynamik zu versöhnen. Zu diesem Zweck betrachtete er einen Ofen mit einer kleinen Öffnung, durch die Strahlung austreten kann. Frühere Physiker hatten gezeigt, dass ein vollkommen schwarzer Ofen sämtliche Strahlungsfrequenzen auf eine Weise emittiert und absorbiert, die von seinem Material unabhängig ist. Die Farbe des emittierten Lichts – der so genannten Schwarzkörperstrahlung – hängt nur von der Temperatur des Ofens ab. Planck wollte die fundamentalen physikalischen Zusammenhänge entdecken, die das Spektrum dieser Strahlung bestimmen.

Zur selben Zeit maßen die Experimentalphysiker das Spektrum der Schwarzkörperstrahlung mit immer größerer Genauigkeit – inklusive der infraroten und ultravioletten Komponenten –, und Planck hoffte mit seiner Theorie ihre Beobachtungen zu erklären. Später bezeichnete er seinen Lösungsweg als einen »Akt der Verzweiflung«. Denn damit seine Theorie mit den Experimenten übereinstimmte, musste er postulieren, dass der Energieaustausch im Ofen stets in diskreten Portionen stattfindet, die Max Planck Quanten nannte.

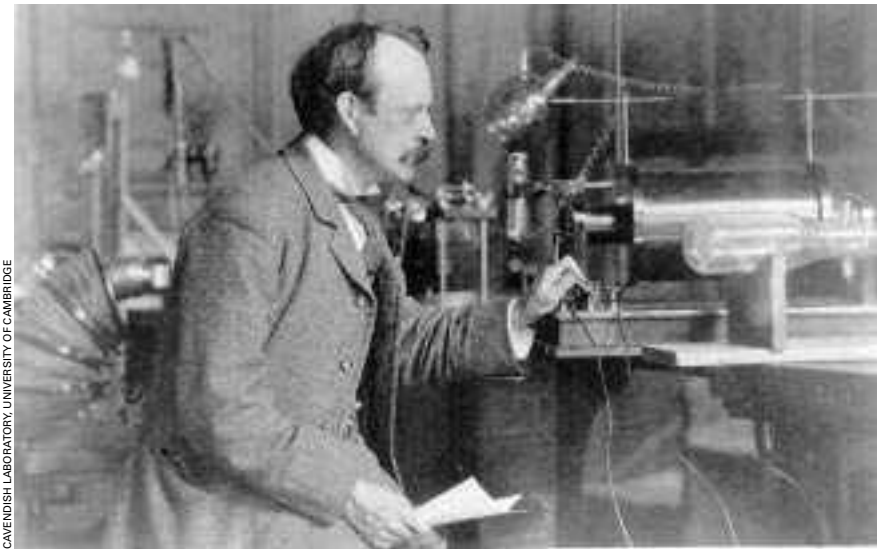
Planck war beunruhigt, weil diese Annahme für ihn keinen Sinn ergab. Um sie zu klären, konstruierte er eine neue Ableitung seines Resultats, welche die zentrale Rolle des Atoms betonte. Obwohl die Atomtheorie am Ende des 19. Jahrhunderts weitgehend akzeptiert war, sahen bedeutende Wissenschaftler wie Wilhelm Ostwald und Ernst Mach in den Atomen nur theoretische Konstrukte und bestritten ihre physikalische Realität.

Anfangs hatte Planck selbst zu diesen Zweiflern gehört, wandelte sich aber wegen seiner Auffassung der Wahrscheinlichkeit zum überzeugten Atomisten. Er argumentierte, ohne diskrete, abzählbare Objekte könne es keine Statistik geben; auch die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Augenzahl mehrerer Würfel hänge schließlich von den diskreten Zuständen ab, die durch die Seiten eines einzelnen Würfels gegeben seien. Auch die mathematische Physik beruhte nach Plancks Überzeugung auf der relativen Wahrscheinlichkeit von Zuständen, die deshalb nur diskret und somit atomar sein konnten.

Diesen Ansatz erweiterte Planck nun derart, dass er nicht nur gasförmige Ansammlungen von Atomen erfasste, sondern auch das Licht selbst. Strahlung, dessen war Planck sich sicher, gehorcht, obgleich sie immateriell ist, den Gesetzen der Thermodynamik. Diese Gesetze hielt er für so allgemein, dass er sich keine Ausnahme davon vorstellen konnte. Also musste eine Grundlage für das Zählen der unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten von Strahlungszuständen existieren; es musste sozusagen »Atome« des Lichts geben – und das wiederum konnte nur diskrete Zustände der Strahlungsenergie bedeuten, also Quanten. Entscheidend war Folgendes: Um die verschiedenen Arten zu zählen, auf welche die Energie sich auf die Lichtquanten verteilen konnte, musste Planck Letztere als absolut ununterscheidbar behandeln; andernfalls erhielt er Resultate, die dem Experiment widersprachen.

Eine seltsame Zählmethode für absolut identische Lichtquanten

An diesem Punkt kommentierte Planck seine seltsame Zählmethode nicht weiter – vielleicht, weil ihn die Notwendigkeit, diskrete Zustände einzuführen, noch viel mehr beunruhigte, das heißt der »verzweifelte« Schritt, Quantensprünge zuzulassen, deren Maß nicht null war, sondern eine endliche Zahl h. Sogar noch 1909 präsentierte er die ungewöhnliche Zählweise, offenbar ohne ihre Seltsamkeit zu erkennen, als wäre sie eine Eigentümlichkeit seines theoretischen Ansatzes und nicht des Lich- ▷



CAVENDISH LABORATORY, UNIVERSITY OF CAMBRIDGE

Der englische Physiker J. J. Thomson experimentierte gegen Ende des 19. Jahrhunderts mit Kathodenstrahlen und entdeckte, dass sie aus geladenen Teilchen mit identischen Eigenschaften bestehen: Das Verhältnis von elektrischer Ladung zu Masse ist bei allen dasselbe. Diese Tatsache sprach dafür, dass subatomare Teilchen – in diesem Fall Elektronen – völlig ununterscheidbar voneinander sind.

tes selbst. Planck war andererseits so aufrichtig, dass er zu seiner Behauptung stand, obwohl er sich gleichzeitig alle Mühe gab, ihre Paradoxie zu überwinden.

Plancks ungewöhnliche Zählweise der Lichtquanten war nur der Anfang. Radikaler Individualitätsverlust wurde schließlich zum zentralen Bestandteil der voll entwickelten Quantentheorie. Bezüglich der Quantenpartikel betonte Erwin Schrödinger 1952, man dürfe sich nicht einmal vorstellen, irgendeines von ihnen sei quasi mit einem roten Punkt markiert, sodass man es später als dasselbe erkennen könne. Somit kann man nicht einmal theoretisch ein einzelnes Neutron herauspicken, es markieren und sein Schicksal verfolgen, wie sowohl Newton als auch Einstein angenommen hatten. Diese verblüffende Kombination von vollkommener Gleichheit mit völliger Ununterscheidbarkeit bildet das Wesen der Quanten-Identität.

Keine menschliche Sprache hat ein passendes Wort für diese Bedingung. Bezeichnet man sie als »Mangel an Individualität«, so unterstellt man fälschlich, Quantenpartikel sollten eigentlich Individualität besitzen, aber sie fehle ihnen. Stattdessen habe ich ein Wort geprägt, das diese Bedingung positiv ausdrücken soll: Identikalität. Es bedeutet, dass die Mitglieder einer Spezies nur als Beispiele für diese Spezies Identität besitzen – ohne irgendwelche Eigenschaften, die ein Individuum von einem anderen unterscheiden. Identikalität umfasst totale Ununterscheidbarkeit und völlige Gleichheit aller beobachtbaren Eigenschaften, wann und wo immer sie gemessen werden.

Diese Bedingung ist so seltsam, dass manche Philosophen Quantenteilchen lieber behandeln, als hätten sie eine Individualität, die dem Beobachter irgendwie verborgen bleibt. Dieses Verborgensein ist zwar logisch möglich, kommt mir aber unnötig kompliziert vor. Ich vertrete den einfacheren Standpunkt, dass eine total versteckte Individualität gar nicht vorhanden ist. Ich überlasse es dem Leser zu beurteilen, welcher Standpunkt letztlich zutrifft oder ob ein Urteil überhaupt möglich ist.

Über die Individualität hinaus

Ein praktisches Beispiel für Identikalität beruht auf Experimenten, die Johann Summhammer und Hermann Rauch an der Technischen Universität Wien und Anton Zeilinger am Massachusetts Institute of Technology durchgeführt haben. In einem evakuierten Gefäß wird ein Neutronenstrahl, der aus einem Kernreaktor stammt, in zwei Strahlen aufgespalten; beide Strahlen werden durch Siliziumkristalle geführt und darin so abgelenkt, dass sie sich dahinter wieder vereinigen. Der Querschnitt der Neutronenstrahlen ist nicht größer als eine kleine Briefmarke. Da die Kristalle mehrere Zentimeter voneinander entfernt liegen, sind die beiden Pfade deutlich getrennt. Dennoch ist es unmöglich, identische Neutronen anhand des Weges, den sie nehmen, zu unterscheiden. Das charakteristische Muster, das sie erzeugen, wenn die Strahlen sich vereinigen, entsteht durch wellenförmige Interferenz zwischen den Neutronen. Darin kommt die Unmöglichkeit zum Ausdruck, ihre Individualität zu bestimmen – obwohl die Neutronen den Detektor auf der anderen Seite stets als ganze und ungeteilte Partikel erreichen. Dieses seltsame Gemisch von Phänomenen wird üblicherweise als Welle-Teilchen-Dualismus bezeichnet (Spektrum der Wissenschaft 2/1995, S. 50).

Statt zu versuchen, uns ein Neutron irgendwie als zugleich wellen- und teilchenförmig vorzustellen, können wir einfach einsehen, dass diese beiden Aspekte die Identikalität des Neutrons widerspiegeln. Um diese Idee zu prüfen, kann man das Experiment ein wenig abändern. Jedes Neutron besitzt eine bestimmte innere Quantität namens Spin. Es ist möglich, eine Quelle zu benutzen, die polarisierte Neutronen erzeugt – das heißt, ihre Spins sind alle parallel ausgerichtet und zeigen beispielsweise aufwärts. Eine solche Quelle produziert dasselbe Resultat wie zuvor, denn die Neutronen sind nach wie vor ununterscheidbar. Doch wenn man einen speziellen Magneten einführt, der den Spin der Neutronen nur längs eines Pfades kippt, so werden die Neutronen der beiden Pfade unterscheidbar – und das Interferenzmuster verschwindet!

Der Welle-Teilchen-Dualismus beruht auf der »Identikalität«

Diese für Quanteninterferenz charakteristischen Effekte entstehen auch mit größeren Partikeln: mit Atomen, mit kleinen Molekülen und sogar mit Fullerenen, bei denen sechzig Kohlenstoffatome fußballähnliche Kügelchen bilden. In solchen Experimenten kann die Quelle so schwach sein, dass sich zu jedem Zeitpunkt nur ein einziges Teilchen im Apparat aufhält. Darum geht es nicht in erster Linie um die Ununterscheidbarkeit von zwei Teilchen,

AIP / EMILIO SEGRÈ VISUAL ARCHIVE

Max Planck erhielt die korrekte Formel für die Strahlung schwarzer Körper nur, wenn er die Strahlungsquanten als völlig identisch behandelte. Unterscheidbare Quanten hätten bei der statistischen Zählung ein anderes Resultat ergeben. Auch beim Werfen von zwei Münzen macht es beim Abzählen der möglichen Kombinationen von Kopf oder Zahl einen Unterschied, ob es sich um absolut identische »Quantenmünzen« handelt (links) oder um gewöhnliche unterscheidbare Geldstücke (Mitte).

sondern vielmehr um die fortgesetzte Identität jedes Teilchens mit sich selbst im Laufe der Zeit und auf seinem Weg durch den Raum. Somit bewahrt sogar ein einzelnes Neutron seine Identikalität.

Dieser Begriff hat durchaus seine Tücken. Wir können uns auf ein Neutron im Raum A beziehen und auf ein anderes im Raum B – in unterschiedlichen Gebäuden oder gar in verschiedenen Galaxien. Doch dabei unterscheiden wir streng genommen nicht die Neutronen, sondern nur die Räume, in denen sie sich aufhalten. Falls die eingeschlossenen Partikel jemals entkommen, können sie nie mehr voneinander unterschieden werden.

Das trifft sogar auf die erstaunlichen Bilder zu, die Hans Dehmelt 1980 an der Universität von Washington in Seattle von einem einzelnen Atom herstellte; das Atom wurde in einer winzigen Falle fixiert und von anderen Atomen ferngehalten. Man kann hier also tatsächlich ein individuelles Atom anhand der von ihm emittierten Lichtblitze sehen. Sie sind ein direkter Ausdruck der Quantensprünge, die entstehen, wenn das Atom Licht absorbiert, angeregt wird und seine überschüssige Energie abstrahlt. Ein solches Atom kann monatelang gefangen bleiben; eines wurde den Experimentatoren so vertraut, dass sie ihm den Namen Astrid gaben. Dennoch bleibt es selbst nach noch so langer Gefangenschaft wild und ohne Individualität: Wenn man Astrid freilässt, ist es unmöglich, sie wieder einzufangen. Der Name ist menschlich, das Atom aber bleibt namenlos.

Dehmelts Kunststück baute auf früheren Versuchen auf, bei denen ein einzelnes Elektron bis zu zehn Monate lang gefangen blieb. Doch letzten Endes ging es immer verloren und wurde zu einem gesichtslosen Elektron in der Menge. Diese Anonymität lässt sich auch nicht verhindern, indem man die Falle immer kleiner macht. Je kleiner die Zelle, desto größer die erforderlichen Kräfte: Das Elektron bewegt sich immer regelloser und heftiger, als wehre es sich dagegen, fixiert zu werden. Dieser Anthropomorphismus ist zwar nicht korrekt – ein Elektron hat natürlich weder Gefühle noch Willen –, aber er liefert eine lebhafte und plastische Metapher für das so genannte Heisenberg'sche Unbestimmtheitsprinzip: Je mehr man ein Teilchen räumlich lokalisiert, desto unbestimmter wird sein Impuls. Die Zelle besteht aus Elektronen, die mit dem Gefangenen identisch sind; wenn die Zelle immer enger wird, wächst die Wahrscheinlichkeit, dass der Gefangene mit einem der Wärter die Plätze tauscht.

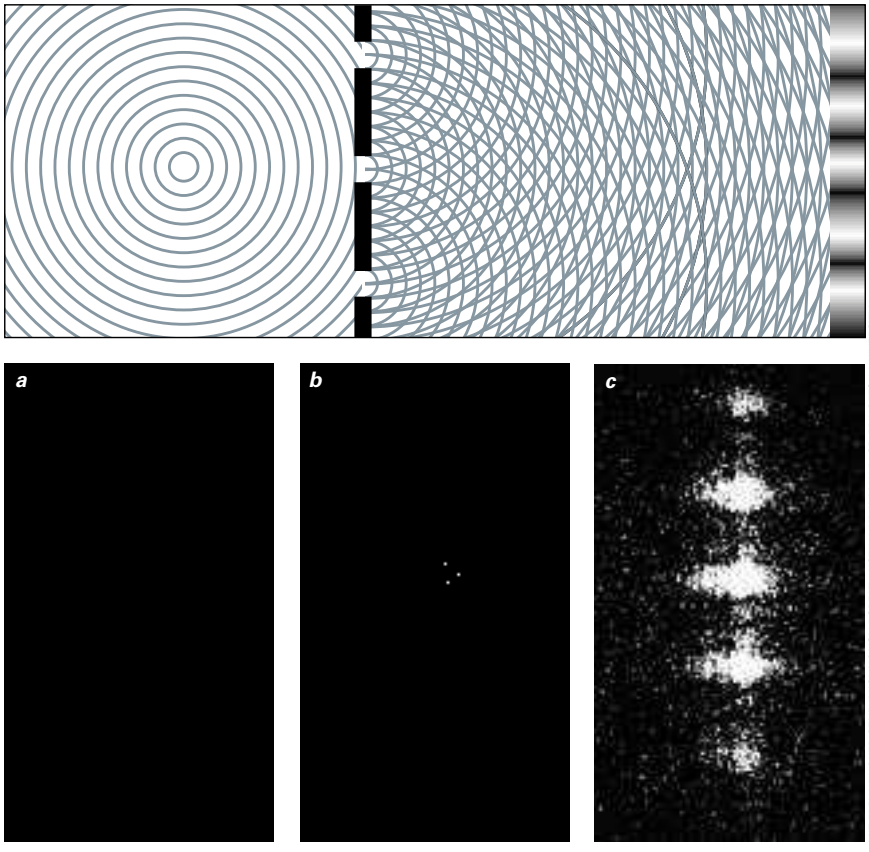
Einsteins Protest

Genau diese Möglichkeit des Austausches verhindert, dass man ein Atom oder ein Neutron behandeln kann, als wäre es säuberlich getrennt von seinesgleichen. Wie eineiige Zwillinge führen Quantenteilchen den Beobachter durch Platztauschen an der Nase herum. Dieser Vergleich hinkt freilich, denn menschliche Zwillinge sind bei weitem nicht so identisch wie Atome.

Die Verwechslung der Identität führt zu verblüffenden Quanteneffekten – insbesondere zu den »spukhaften« Korrelationen, die Einstein so unannehmbar fand, als wären sie der ärgerliche Schabernack boshafter Zwillinge. Er bestand darauf, dass die Physik eine vollständige Beschreibung des individuellen Systems geben müsse, damit wir der Bahn individueller Atome folgen und ihre Aktivitäten vorhersagen können. Doch diese Fähigkeit würde die Identifikation jedes Teilchens als eines einzigartigen Individuums erfordern – und das ist unmöglich.

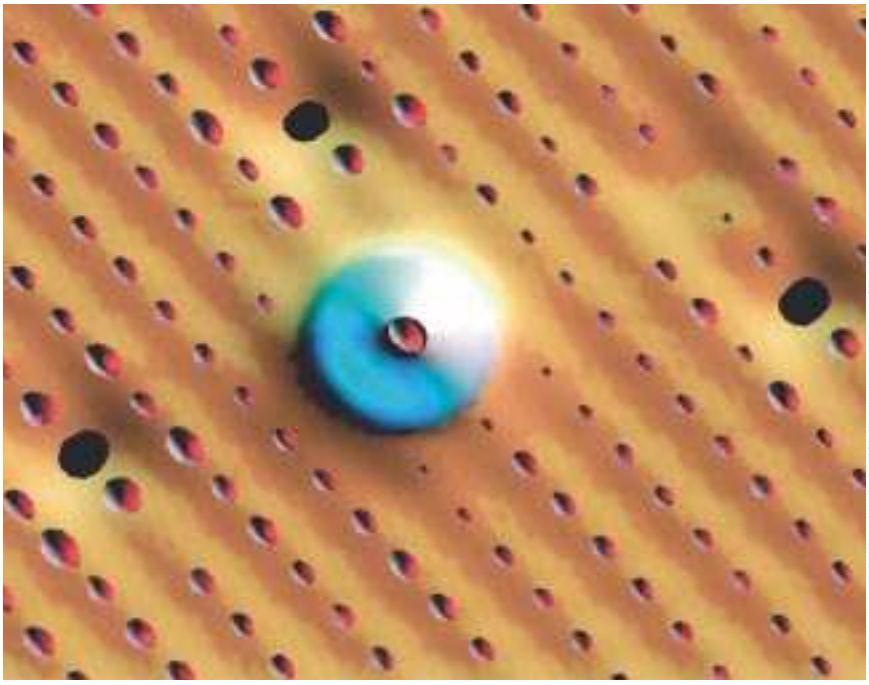
Einsteins Einwände folgten aus seinem Glauben, dass die physikalischen Gesetze letztlich die Bahn jedes individuellen Partikels vollständig determinieren, genau wie Newton sich das vorgestellt hatte: Jedes Teilchen hat seine beobachtbare Position und Geschwindigkeit, die einer mathematischen Gleichung gehorchen. Aber die Identikalität zwingt uns, über die Newton'sche Beschreibung identifizierbarer Teilchen hinauszugehen. So entstand ein völlig neuartiges Bild der Quantentheorie, das Max Born 1928 formulierte.

Um die Individualität zu verbergen, unterteilte Born die Welt in zwei Schichten: eine äußere Schicht positiver Zahlen, welche die Wahrscheinlichkeit angeben, ein Teilchen irgendwo in Raum und Zeit zu beobachten, und eine innere Schicht, ▷



MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG VON ROBERT AUSTIN UND LYMAN PAGE, PRINCETON UNIVERSITY

Wenn Lichtwellen durch enge Schlitze treten, entsteht dahinter ein charakteristisches Interferenzmuster (oben). Das Licht besteht aus einzelnen Photonen, die miteinander interferieren – selbst wenn die Intensität des Lichts so gering ist, dass immer nur ein einzelnes Photon den Apparat passiert. In diesem Fall zeigt der Schirm nach sehr kurzer Zeit nur wenige Photonen an (*a*). Aber schon 150 Photonen lassen das Muster ahnen (*b*), und nach dem sukzessiven Durchgang von rund 15000 Photonen sind deutliche Interferenzstreifen zu sehen (*c*).



MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG VON DON EIGLER, IBM ALMADEN RESEARCH

Unter dem Rastertunnelmikroskop wird ein einzelnes Xenon-Atom sichtbar. Das erweckt den trügerischen Eindruck, dieses Atom habe eine unverwechselbare Individualität. Doch tatsächlich ist es in jeder Hinsicht völlig identisch mit allen anderen Xenon-Atomen.

▷ die der Beobachtung nicht zugänglich ist, aber die beobachtbaren Wahrscheinlichkeiten steuert. Auf dieser inneren Ebene gibt es Amplituden in Form komplexer Zahlen – das heißt, sie enthalten die Quadratwurzeln negativer Zahlen. Sie sind nicht beobachtbar, denn unsere Messgeräte registrieren nur reelle Zahlwerte. Für diese Amplituden gelten strenge Regeln wie die Schrödinger- oder die Dirac-Gleichung, die ihre zeitliche Entwicklung ohne Unbestimmtheit determinieren.

Doch die Wahrscheinlichkeiten, die man beobachtet, erweisen sich als das Absolutquadrat dieser Amplituden – und diese Wahrscheinlichkeiten entwickeln sich nicht auf deterministische Weise. Zum Beispiel legt die Wahrscheinlichkeit, ein Neutron an einem bestimmten Ort und zu einer bestimmten Zeit zu finden, nicht eindeutig die Wahrscheinlichkeit dafür fest, es später an einem anderen Ort und zu einem anderen Zeitpunkt anzutreffen, denn das würde eine Identifikation des Teilchens bedeuten. Darum existiert keine Gleichung, die jedes Auftreten des Neutrons mit Sicherheit vorhersagt, sondern nur eine Gleichung, die angibt, mit welcher Wahrscheinlichkeit man das Neutron hier oder da antreffen würde.

Die Mathematik liefert zwar nur eine abstrakte Darstellung der physikalischen Wirklichkeit, bietet aber einen tiefen Einblick in das Wesen dieser Wirklichkeit und vertreibt weit verbreitete Missverständnisse. In der Quantentheorie geht es letztlich gar nicht um Unbestimmtheit und Indeterminismus. Auf der inneren Ebene ist die Quantentheorie ebenso bestimmt und determiniert wie die Theorien von Newton und Maxwell. Die beobachtete Unbestimmtheit entsteht erst, wenn wir diese innerlich determinierten Dinge von außen zu betrachten versuchen.

Die Bestimmtheit der Quanten

Wir selbst sind aus einer immensen Anzahl von Elektronen und Quarks – den Bausteinen unserer Protonen und Neutronen – zusammengesetzt, die extrem komplexe Zustände bilden können. Erst diese Zustände machen aus, was wir sind – das heißt unsere individuelle Eigenart –, und sie charakterisieren all unsere Versuche, die Welt zu betrachten. Wenn wir ein einzelnes Atom untersuchen wollen, gebrauchen wir vergleichsweise riesige Apparate, die an unsere enorme Größe und unsere groben Sinne angepasst sind, und wir beobachten nur Wahrscheinlichkeitsereignisse. Dennoch vermag unser Geist mit Hilfe der mathematischen Gleichungen zu einer tieferen Ebene der Gewissheit vorzudringen.

Freilich ist ein solches Doppelbild der Welt beunruhigend. Nach Einsteins Überzeugung gab die Quantenmechanik das zentrale Anliegen der Physik preis: vollständiges Verstehen beobachtbarer Daten durch mathematische Theorie. Er weigerte sich, Borns Ansicht zu teilen: Was beobachtbar ist, ist nicht gewiss, und was gewiss ist, ist nicht beobachtbar.

Einstein erkannte die Wirksamkeit und Gültigkeit der Quantentheorie durchaus an, aber er hielt sie für unvollständig. Seine Vorstellung von Verstehen erforderte, über diese scheinbaren Grenzen des Wissens hinauszugehen. Er glaubte, jedes Neutron habe wirklich seine eigene Individualität, über die wir uns zwar im Unklaren sein mögen – aber Gott kenne sie ganz und gar.

Doch kein Beobachter, nicht einmal Gott, vermag ein Neutron vom anderen zu unterscheiden. Kein Wunder, dass Einstein diese Idee widerstrebte, denn sie ist wirklich seltsam. Aber wie schon Francis Bacon vor fast 300 Jahren schrieb, gibt es keine auffallende Schönheit, die in ihrem Übermaß nicht etwas Seltsames hat. Vielleicht gilt das auch umgekehrt: Die Seltsamkeit der Identikalität könnte uns lehren, ihre Schönheit zu erkennen. ◁

Peter Pesic ist Dozent (Tutor) und fest angestellter Musiker (Musician-in-Residence) am St. John's College in Santa Fe (New Mexico). Er promovierte 1975 in Physik an der Stanford University. Der Artikel ist ein Auszug aus seinem letzten Buch »Seeing Double: Shared Identities in Physics, Philosophy, and Literature« (MIT Press, 2002).

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Literaturhinweise

Identity and the Foundations of Quantum Theory. Von Peter Pesic in: Foundations of Physics Letters, Bd. 13, S. 55 (2000).

The Principle of Identicality and the Foundations of Quantum Theory. I. The Gibbs Paradox. II. The Role of Identicality in the Formation of Quantum Theory. Von Peter Pesic in: American Journal of Physics, Bd. 59, S. 971 (1991).

Quantum Physics and the Identity of Indiscernibles. Von S. French und M. Redhead in: British Journal for the Philosophy of Science, Bd. 39, S. 233 (1988).

Individuality: An Essay on the Foundations of Metaphysics. Von J. J. E. Gracia. State University of New York Press, Albany 1988.

Direct Observation of Fermion Spin Superposition by Neutron Interferometry. Von J. Summhammer et al. in: Physical Review A, Bd. 27, S. 2523 (1983).

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

SPEZIAL: NOTFALLMEDIZIN

Telefon: 112

Wenn ein Hirnschlag einen Menschen niederstreckt oder ein Unfallopfer schwer verletzt auf der Straße liegt, zählt jede Sekunde. Dann greift eine Notfallkette, die heute die ganze Palette medizinischer Techniken nutzt und durch Forschung ständig verbessert wird.

RETTUNGSDIENST INTERMEDIC, SCHWEIZ

POLYTRAUMA

Das Notfall-Räderwerk

Von den Erstmaßnahmen am Unfallort bis zur Behandlung auf der Intensivstation erfordern lebensbedrohliche Vielfachverletzungen eine minutiöse Koordination der beteiligten Ärzte.

Von Hannes Eichinger und Pablo Hagemeyer

Wegen eines Unfalls ist die A5 in beiden Fahrtrichtungen gesperrt.« Eine ganz alltägliche Verkehrsmeldung. Wer nun im Stau wartet, der sich bald an der Unfallstelle gebildet hat, denkt selten an die möglichen Opfer. Allenfalls die schrille Sirene des Rettungswagens lässt das Blut kurz stocken. Und wenn dann endlich der Ort des Geschehens in Sicht kommt, eine Trage vielleicht, Autowracks und Sanitäter, kommt der Gedanke: Gott sei Dank, es hat einen anderen erwischt.

Doch gefeit ist niemand. Das Verkehrsaufkommen wächst und trotz Airbag, Gurt und Knautschzone bleibt ein erhebliches Risiko, auf der Straße zu Tode zu kommen. Dieses im Ernstfall zu verringern, ist Aufgabe der Intensivmedizin und das Anliegen der Ärzte und Sanitäter. Die medizinische Forschung entschlüsselt die verhängnisvollen Prozesse beim so genannten Polytrauma, der vielfachen Verletzung von Organen, und optimiert die Notfallkette entsprechend.

Sobald die Unfallmeldung bei einer Rettungsleitstelle eingegangen ist, werden der Dienst habende Notarzt und sein Team aus Fahrern und Sanitätern alarmiert. Es geht um Sekunden. Während der Fahrt erhält das Team genauere Informationen und kann sich entsprechend einstellen: ein brennendes Fahrzeug, aus dem beherzte Autofahrer zwei verletzte Personen geborgen haben; diesem Szenario nach schweben vermutlich Menschen in Lebensgefahr.

Zum Glück bilden die Fahrzeuge im Stau rasch eine Gasse und auch die sonst üblichen Gaffer fehlen, der Rettungswagen kommt gut durch. Am Unfallort geht alles sehr schnell und routiniert: Latexhandschuhe überstreifen, Heraustragen der Notfallkoffer mit Infusionssystemen, Beatmungsgerät und Medikamenten. Das Elektrokardiogramm (EKG) zur Ableitung der elektrischen Herzkurve und ein Sauerstoffgerät werden bereitgestellt. Auf dem Weg zu den Opfern versucht der Notarzt zudem, ein Bild des Unfallhergangs zu gewinnen, denn die Verletzungen eines Aufpralls unterscheiden sich von denen beim Fahrzeugüberschlag. Schon jetzt muss der Notarzt auch abwägen, ob er zusätzliche Behandlungs- und Transportmöglichkeiten anfordern muss.

Grundsätzlich gilt: erst untersuchen, was erhalten ist, dann prüfen, was verletzt ist. Der Notarzt kontrolliert deshalb sofort die Ansprechbarkeit der Verunglückten: »Haben Sie Schmerzen?« Keine Antwort. »Spüren Sie das?« Doch auch auf gezielte Schmerzreize erfolgt keine verbale Reaktion, bei beiden Opfern ist das Bewusstsein offenbar getrübt. Um das Ausmaß des Polytraumas abzuschätzen, prüft der Arzt die lebenserhaltenden Organsysteme: Löst das Licht seiner Taschenlampe keine Pupillenkontraktion aus, sind Hirnfunktionen beeinträchtigt; die Puls- und Blutdruckmessung dient der Kontrolle des Herz-Kreislaufsystems, Abhören der Lunge zeigt, ob die beiden Flügel des Organs belüftet werden und die Atmung somit gewährleistet ist. Durch Abtasten des Bauches lässt sich eine massive innere Blutung entdecken, Bewegen von Armen und Beinen macht Knochenbrüche oder Gelenkverletzungen offenkundig. Das Rückenmark sowie das periphere Nervensystem testet der Arzt

durch Auslösen von Reflexen, etwa durch Zwicken, zugleich werden auch offene Wunden inspiziert. Dieser »Bodycheck« dauert keine halbe Minute.

Intensivmedizin am Unfallort

Noch vor wenigen Jahrzehnten wurden Verletzte sofort mit dem Krankenwagen in die Klinik gefahren. Mit dem immer umfangreicheren Wissensstand über die pathophysiologischen Prozesse, die zeitgleich mit schweren Verletzungen einhergehen, hat sich die Versorgung der Opfer grundlegend geändert. Deswegen beginnt das Rettungsteam selbst mit einer intensivmedizinischen Versorgung der Opfer, die später im Akutkrankenhaus fortgeführt werden soll. Dabei muss der Notarzt das weitere Vorgehen pragmatisch strukturieren, und das heißt auch: Schwerverletzte, die wahrscheinlich überleben, haben Vorrang vor solchen mit einer geringeren Überlebenschance. Die Herzstromkurve, das EKG, wird angelegt, Infusionen verabreicht, Schmerzmedikamente aufgezogen und bereitgestellt, Wunden verbunden, die Körperlagerung beachtet. Außerdem wird bei einem Polytrauma zumeist eine Narkoseeinleitung für den Notarzt vorbereitet. Die Erfahrungen der vergangenen Jahre über die Spätfolgen einer verlängerten Schockphase lassen alle Beteiligten zügig und konzentriert an der Kreislaufstabilisierung arbeiten. All diese Tätigkeiten laufen routiniert nebeneinander ab, von kurzen Kommandos des Arztes ausgelöst.

Wie sich die verschiedenen Verletzungen gegenseitig aufschaukeln, schätzt er immer wieder anhand von Parametern ein. Zur Beurteilung zentralnervöser Störungen dient die Glasgow Coma Scale (GCS): Wie schnell und weit weit öffnete das Opfer auf Ansprache seine Augen? Was war die beste motorische und die beste verbale Reaktion? Ein Punktesystem ergibt einen Summenwert, der den Zustand der aktuellen Hirnleistung widerspiegelt. Beispielsweise zählt der Arzt vier Punkte für ein spontanes Augenöffnen, nur drei, wenn dazu eine Ansprache, zwei, wenn ein Schmerzreiz erforderlich ist, einen Punkt, wenn die Augen geschlossen bleiben. Ein gesunder Mensch erreicht die Maximalpunktanzahl von 15. Patienten mit Werten unter 10 sind unter Umständen lebensgefährlich verletzt, unter 6 sinken die Überlebenschancen rapide. Je kleiner dieser Wert, desto schwerer sind die zu erwartenden neurologischen Folgeschäden.

Nur Minuten sollten zwischen einem schweren Unfall und dem Eintreffen von Notarzt und Rettungswagen liegen. Am Unfallort werden die Opfer bereits mit den Mitteln der Intensivmedizin versorgt.

Wie stabil der Kreislauf ist, sagt der Schockindex. Falls die Herzfrequenz über dem Wert des höchsten arteriellen Blutdrucks liegt, befindet sich der Patient in einem Schockzustand (siehe Glossar Seite 66). Die Gewebe der Organe sind dann unzureichend durchblutet und erhalten damit auch zu wenig Sauerstoff. Der Blutverlust lässt sich grob abschätzen. Beispielsweise fließen bei einem Bruch des Oberarmknochens aus den verletzten Ge- ▷

▷ fäßen im Durchschnitt 200 bis 800 Milliliter, beim Oberschenkel sind es bis zu drei Liter. Bei Verletzungen innerer Organe können bis zu fünf Liter Blut in den Bauchraum austreten, doch das würde den Tod des Patienten bedeuten – etwa sechs Liter fließen insgesamt im Kreislaufsystem eines Erwachsenen.

Dem Volumenverlust sollen massive Infusionen isotoner Lösungen entgegenwirken. Das mag zwar die Druckverhältnisse im Körper aufrecht erhalten und damit einen Kollaps des Kreislaufsystems verhindern, doch diese Salzlösungen enthalten keine Blutkörperchen, also keine Sauerstoffträger. Die Mangelversorgung von Herz und Gehirn lässt sich damit also nicht verhindern: Während die Extremitäten bis zu zwei Stunden ohne Sauerstoff auskommen können, erleidet das Gehirn bereits nach wenigen Minuten irreparable Schäden. Der Körper reagiert deshalb auf große Verletzungen mit einem Notprogramm: Extremitäten und Organe wie Nieren, Darm und Haut werden zugunsten des zentralen Nervensystems und des Herzens schlechter durchblutet.

Hat sich Blut im Brustkorb angesammelt, kann das zudem die Atmung oder die Beatmung erschweren, ja sogar unmöglich machen. Der Notarzt führt in dem Fall eine Drainage, also ein kurzes Schlauchsystem, über die Brustwand ein. Doch das birgt die Gefahr eines Multiorganversagens (siehe Glossar). Deshalb müssen alle offenen und sichtbaren Blutungen soweit möglich gestoppt und eine schnelle operative Therapie organisiert werden.

Die Forschung der letzten Jahre hat aber gezeigt: Je länger der Schockzustand andauert, desto schlechter die Prognose. Je komplexer das Verletzungsmuster, desto dringlicher wird ein Krankenhausaufenthalt mit Maximalversorgung. Fünf bis zehn Minuten nach Ankunft der Retter kann der Transport erfolgen, und einer der Sanitäter fordert zwei Rettungshubschrauber an.

Etwa zwei Drittel der polytraumatisierten Opfer erleiden eine schwere Kopfverletzung mit Schäden am Gehirn, bei jedem Zweiten sind Brust- und Bauchraum betroffen. Bleiben wir beim Beispiel. Der Notarzt resümiert: ein 22 Jahre alter Mann mit Verletzung des Schädels, der Wirbelsäule, des Brustkorbs, des rechten Unterarmes und des rechten Oberschenkels sowie ein 20-jähriger Mann, dessen rechtes Bein auf Höhe des Oberschenkels fast abgetrennt wurde, der zudem innere Blutungen hat und im Bereich des Gesichtsschädels schwer verletzt ist. Die Unfallopfer sind in Vollnarkose gelegt worden.

Eine Viertelstunde später treffen die Hubschrauber ein, an Bord auch eine Anästhesistin. Die Verletzten werden vorsichtig in die Hubschrauber gebracht und dort an die Beatmungsgeräte angeschlossen. Alle Infusionsschläuche und Kontrollkabel werden rasch überprüft, denn ein invasiver Eingriff wie das Neulegen einer Brustkorbdrainage ließe sich bei dem Platzmangel an Bord schlecht bis gar nicht durchführen. Unter ständiger Kontrolle der vitalen Funktionen wie EKG, Blutdruck und Atmung werden die Patienten in die Kliniken geflogen. Am Landeplatz wartet schon ein Rettungswagen, um die Opfer zum so genannten Schockraum zu bringen.

Dieser hat seinen Namen nicht von ungefähr: Der hämorrhagische Schock, das Versagen mehrerer Organe aufgrund hohen Blutverlusts, ist die größte Gefahr für Polytrauma-Patienten. Er steht im Mittelpunkt aller weiteren Maßnahmen. Im Schockraum übergibt der Notarzt »seine« Patienten einem Team von Spezialisten. Ein Protokoll dokumentiert seine Diagnosen, den Verlauf der Versorgung, Medikamente und Eingriffe. Das nun zuständige »Traumateam« besteht aus Anästhesisten, Unfallchirurgen, Radiologen, Krankenschwestern und Pflegern. Wenn es die Umstände erfordern, werden Neurochirurgen, Mund-, Kiefer-, Gesichtschirurgen, Neurologen, Urologen oder auf Verbrennungen spezialisierte Hautärzte hinzugezogen.

Zunächst wird nun der Bauch jedes Patienten mit dem Ultraschallgerät auf akute

GLOSSAR

- Ein **Polytrauma** ist, wörtlich übersetzt, eine »Vielfach-Verletzung«. Es ist meist Folge eines Unfalls, der gleichzeitig mehrere Körperregionen oder Organsysteme geschädigt hat, wobei wenigstens eine Verletzung oder die Kombination lebensbedrohlich ist.
- Verringert sich die Blutmenge im Körper drastisch, sinkt der Blutdruck rapide und der Puls steigt an: Der Patient befindet sich im **Schockzustand**.
- Als **Sepsis** wird eine bakterielle Infektion verletzter Organe bezeichnet. Stoffwechselprodukte der Mikroben sorgen für eine Weitstellung von Gefäßen, so dass ein oft tödlicher septischer Schock auftritt.
- Im Schockzustand kann Wasser aufgrund der veränderten Druckverhältnisse aus dem Blut in das Gewebe um die Lungenbläschen eintreten und den Gasaustausch behindern. Experten sprechen von der **Schocklunge**. Das betroffene Gewebe geht zugrunde und vernarbt.
- Sind einzelne Organe so stark geschädigt, dass sie ihre Funktion nicht mehr ausüben können, und lässt sich dieser Ausfall nicht kompensieren, kann sich das Problem aufschaukeln, bis ein **Multiorganversagen** (MOV) die Folge ist.

DPA

Vom Rettungswagen gelangt der Patient in den Schockraum. Dort bekämpfen die Ärzte Folgen massiver Blutungen und versuchen, den Zustand des Patienten zu stabilisieren.

innere Blutungen untersucht. Zeitgleich beginnen die Anästhesisten, Kontrollgeräte für die Beatmung und die Überwachung des Kreislaufs anzuschließen. Die Blutgruppe wird bestimmt und entsprechende Blutkonserven mit dem sauerstofftragenden Hämoglobin über die Venen zugeführt. Unmittelbar daran schließt sich je nach Verdachtsdiagnose eine Röntgenuntersuchung von Brustkorb und Becken an, gegebenenfalls auch eine Computertomografie (CT).

Im Unfallkrankenhaus Berlin, einer Einrichtung der Freien Universität Berlin, erfolgt die Untersuchung mit einem modernen Spiral-Computertomograf sogar unmittelbar nach der Ultraschall-Begutachtung. Nach nur vier Minuten ist der Patient vom Schädel bis zum Beckenboden mit Schichtaufnahmen im Millimeterabstand »gescannt«. Das Team und ihr »Traumaleader« können am Bildschirm gleichzeitig die Aufnahmen betrachten und sofort erkennen, ob in Schädel, Brust oder Bauchraum Verletzungen vorliegen. Geschlossene Schädelbrüche, Lungenrisse, Schäden an den großen herznahen Gefäßen oder Verletzungen des Darmes können schneller als mit konventionellen Röntgenbildern erkannt werden. Eine operative Versorgung wird sofort eingeleitet, beispielsweise die Bauchdecke geöffnet und die verletzten Gefäße abgebunden. Steigt der Hirndruck infolge einer Blutung an, legen die Ärzte eine Drainage in den Schädel. Je nach Dringlichkeit werden die Operationen zum Teil parallel durchgeführt.

Anschließend werden die Patienten auf die Intensivstation verlegt. In den nächsten 12 bis 48 Stunden kämpfen die Ärzte dort darum, ihren Zustand zu stabilisieren. Unstillbare Blutungen, schwere Verletzungen des Gehirns und Herzstillstand sind nach wie vor die größte Gefahr. Vitalfunktionen wie die Herz-Kreislauf-Parameter werden deshalb kontinuierlich überwacht und das Blut regelmäßig überprüft. Der Gehalt an Sauerstoff und Kohlendioxid, der Säure-Basen-Haushalt, die zellulären Bestandteile des Blutes, Gerinnungsfaktoren und viele Parameter mehr zeichnen ein Bild der Rekonvaleszenz oder der erneuten Verschlechterung der Gesamtsituation.

Den Organfunktionen gilt in dieser Phase besondere Aufmerksamkeit. Lebensgefährlich wäre beispielsweise das so genannte posttraumatische Lungenversagen (*adult respiratory distress syndrome*, ARDS): Eine Anschwellung des Raums zwischen den Zellen des Lungengewebes stört den Gasaustausch an den Lungenbläschen. Vorübergehend muss der Patient über eine künstliche Lunge beatmet werden. Diese »extrakorporale Membranoxigenierung«, kurz EKMO, führt das Blut über eine Membran, wo es mit Sauerstoff angereichert wird. Eine Dauerlösung ist das freilich nicht. Gelingt es nicht, das ARDS zu beheben, stirbt der Patient.

Das Ziel der Behandlung ist in dieser Zeit aber auch die Wiederdurchblutung von Organen, die während des hämorrhagischen Schocks minderversorgt waren. Doch damit sind Risiken verbunden: Das Immunsystem des Körpers hatte in den verletzten Geweben alle Reserven in die Schlacht geworfen, um Krankheitskeime abzuwehren und Gewebetrümmer zu beseitigen, bevor sie den Körper vergiften können. Doch bei schweren Verletzungen ist das System überfordert, und die Immunreaktionen enden in einer allgemeinen Entzündungsreaktion.

Lebensrettende Amputation

Mit der wieder einsetzenden Durchblutung schwärmen nun Heerscharen von Botenstoffen und Killerzellen der bislang unterversorgten, aber noch intakten Gewebe in den Körper aus. Zusätzlich können ausgeschwemmte Zelltrümmer und Zellabbauprodukte die nur langsam wieder anlaufenden Nieren derart belasten, dass sie versagen (im Fachjargon: Crush-Niere). Eine »Blutwäsche« außerhalb des Körpers, Dialyse oder Hämofiltration genannt, muss die Funktion der verletzten Niere übernehmen, in der Hoffnung, dass diese wieder »anspringt«.

Ein verletzter und nun wieder stärker durchbluteter Darm birgt eine andere große Gefahr: Durch die zerstörte Schleimhaut können Keime und deren Stoffwechselprodukte über die Pfortader in den Kreislauf gelangen. Eine Infektion des ganzen Körpers, eine so genannte Sepsis, wäre die Folge (siehe nebenstehendes Glossar), dreißig bis siebzig Prozent der Patienten überleben sie nicht.

All diese Probleme zeigen sich oft erst zwischen dem zweiten und fünften Tag, die Ärzte sprechen von der labilen Intensivphase. Das Zusammenspiel von massivem Blutverlust am Unfallort, Gewebeschaden und den geschilderten Nebeneffekten der Wiederdurchblutung lässt sich nur schwer abschätzen. In dieser Phase gilt: Wenn sich die Wiederdurchblutung etwa eines beinahe abgetrennten Beines tödlich auswirken kann, ist eine Amputation un- ▷

▷ umgänglich. Neurologische Defektsyndrome kristallisieren sich ebenfalls heraus. In dieser Phase entscheidet sich, ob Gehirn und Rückenmark wieder voll funktionsfähig werden oder ob irreversible Schäden bleiben. Im schlimmsten Fall kann in dieser Zeit der Hirntod eintreten. Schließlich bedrohen auch Infektionen durch Keime der Krankenhausflora das Leben des geschwächten Patienten.

Doch haben die Unfallopfer diese Zeit überstanden, beginnt die Regenerationsphase. Operationen dienen nun nicht mehr dem schieren Lebenserhalt, sondern der Genesung: Haut und andere Weichteile werden transplantiert, Gelenk- und Knochenbrüche angegangen; gegebenenfalls kommt auch der Kieferchirurg zum Zug. Die Ärzte überprüfen außerdem ihre Notoperationen, öffnen die OP-Wunden und bringen Noteingriffe in Ruhe zum Abschluss. Spezielle Beatmungsmuster kräftigen die vom Respirator geschwächte Atemmuskulatur, Krankengymnastik hält die Gelenke beweglich und fördert den Aufbau der reduzierten Muskeln.

Mit der Zeit sollte der Verletzte sich besser fühlen und aufmerksamer auf seine Umgebung reagieren. Eingelagerte Flüssigkeit müsste ausgeschwemmt werden, die Urinproduktion sollte sich normalisieren und der Darm wieder seine reguläre Arbeit übernehmen, die Laborwerte sich bessern. Doch von Entwarnung kann keine Rede sein, noch immer drohen Sepsis, Lungen-, Leber- oder Nierenversagen. Erst nach dieser mitunter wochen- bis monatelangen Phase wird der Patient auf eine Normalstation verlegt.

Ein realistischer Ausgang für das eingangs beschriebene Szenario wäre: Der Patient mit den Verletzungen des rechten Beines und des Bauches überlebte nach Entfernung der gerissenen Milz und erhielt eine Oberschenkel-Prothese. Der zweite Patient verstarb noch im Schockraum an Herz-Kreislauf-Versagen. Die Verletzungen, die jede für sich betrachtet nicht so bedrohlich waren, hatten sich zusammen mit dem hämorrhagischen Schock potenziert: Der Kreislauf brach zusammen, die Ärzte konnten nichts mehr für den Patienten tun. ◁

Hannes Eichinger ist Notarzt und strebt den Facharzt Chirurgie an. Er schreibt zu medizinischen Themen für Medien aller Art. Seine Freizeit widmet der Autor der Musik (Preisträger von »Jugend musiziert«). Sein Koautor **Pablo Hagemeyer** betreibt neben seiner Facharztausbildung ein Redaktionsbüro (siehe den folgenden Beitrag).

PSYCHIATRISCHE NOTFÄLLE

»Die Stimme hat es mir befohlen«

Suizidversuch, Wahnvorstellung, Delir – im Notfall wird der Arzt zum Psychiater.

Von Pablo Hagemeyer

Deutschland, im Herbst. Ein Notarzt wird zu einem abgelegenen Bauernhof beordert. Der Bauer hatte versucht, sich mit seiner Jagdflinte zu erschießen, sie aber zum Glück nicht entsichert. Er ist einer von 280 000 Personen alljährlich, die in Deutschland wegen Selbstmordversuchs aktenkundig werden. Darin sind auch Menschen erfasst, die eine Tötungsabsicht nur andeuten, echte Versuche sowie die 14 000 pro Jahr, die ihr Vorhaben »erfolgreich« durchführen. Das sind mehr als doppelt so viele, wie im gleichen Zeitraum durch Verkehrsunfälle sterben.

Zu welcher Gruppe von Patienten gehört der Bauer in dem nach einem realen Fall konstruierten Szenario? Er habe einiges getrunken, berichtet die verstörte Ehefrau dem Notarzt. Sie sei dann zu Bett gegangen, aber vor einer halben Stunde habe er sie geweckt und ihr einfach so gesagt, dass er es gerade versucht hat. Die Waffe liegt noch neben dem apathisch wirkenden Mann auf dem Fußboden. Der Arzt nimmt sie an sich und spricht den Patienten an. »Ich habe es nicht geschafft, Herr Doktor ...«, erklärt der mit schwerer Zunge. Sein Blick ist traurig. »Dabei haben sie es mir befohlen.«

»Sie«, das erfährt der Arzt beim ersten psychopathologischen Befund, sind Stimmen, die der Mann seit vielen Jahren schon hört. Doch er hatte niemandem davon erzählt und es war selbst seiner Frau kaum aufgefallen. Er habe halt manchmal so blumig gesprochen, berichtet diese, wäre auch ohne rechten Grund traurig gewesen. Und seit einiger Zeit leide er wohl unter starken Kopfschmerzen, war auch schon beim Hausarzt deswegen, aber dieser habe nichts finden können.

Dieses Fallbeispiel zeigt eine leider allzu häufige Realität. Von Depressionen oder Wahnvorstellungen gepeinigt ziehen sich die Kranken zurück und gewähren niemandem Einblick in ihr Innenleben. Nicht selten kündigen sie ihre Absicht sogar ein- oder mehrmals an, werden darin aber fatalerweise nicht ernst genommen. Auch der Hausarzt hat nicht erkannt, dass den Kopfschmerzen des Bauern eine andere Problematik zugrunde lag.

Für den Notarzt geht es in dem Moment darum zu klären, ob sein Patient nach wie vor den Gedanken an Selbsttötung hegt oder ob er sich nunmehr davon distanzieren kann. Zur Sicherheit wird er ihn aber in eine Klinik einweisen. Bis der Facharzt das Gegenteil feststellt, gilt ein Suizidant als lebensgefährdet. Nicht minder wichtig ist die Frage, ob von ihm eine Gefahr für andere ausgeht – gern berichten Medien über Menschen, die zuerst Mitglieder ihrer Familien und anschließend sich selbst töten.

Suizid und Wahn

Der Hinweis auf eine Stimme, die den Freitod befohlen hat, verweist häufig auf eine geistige Erkrankung, dann oft auf eine Schizophrenie. Nicht Verzweiflung angesichts unlösbarer Probleme hatte den Patienten getrieben, sondern akustische Halluzinationen.

Diese erste Verdachtsdiagnose stellt der Arzt im Gespräch. Der formale Ablauf unterscheidet sich dabei nicht von anderen psychiatrischen Notfällen, etwa Menschen im Entzug oder mit ausgeprägt aggressiven Verhalten. Nicht selten machen etwa verwirrte Menschen auf andere einen durchaus normalen Eindruck. Stellt der Arzt aber Fragen zur Orientierung – »Welchen Tag haben wir heute?«, »Wo befinden wir uns?«, »Wie heißen Sie?«, »Wissen Sie, was vorgefallen ist?« –, vermögen die Patienten nicht zu antworten. Je nach Krankheitsbild können Denkabläufe formal gestört sein, zum Beispiel sprunghaft, aber auch inhaltlich zerfahren: Leidet der Patient unter einem Wahn, etwa der Vorstellung, ständig verfolgt, beobachtet, bedroht oder verhext zu werden? Ist sein Ich-Empfinden gestört, berichtet er beispielsweise, dass ihm fremde Gedanken in den Kopf eingegeben werden oder dass sich sein Körper auflöst?

DPA

Nimmt er die Welt als künstlich wahr, von jemandem gemacht? Leidet er unter Halluzinationen? Schwanken seine Gefühle heftig zwischen Extremen wie Euphorie, Wut oder Angst?

Letztlich kann nur der Facharzt die genaue Ursache nach längerer Beobachtung klären. Aber der Anfangsbefund »selbstmordgefährdet« gilt so lange, bis der Psychiater das Gegenteil feststellt. Schwerste psychische Veränderungen werden oft als Psychose bezeichnet – ein Terminus, dessen Bedeutung in Fachkreisen kontrovers diskutiert wird. Hans-Jürgen Möller, Direktor der Nervenklinik an der Münchner Ludwig-Maximilians-Universität definiert die Psychose als eine »psychische Störung mit grundlegendem Wandel des eigenen Erlebens und des Außenbezugs, entweder im Rahmen einer organisch fassbaren Störung oder im Rahmen von Veränderungen des Gehirnstoffwechsels«.

Im ersten Fall spricht der Arzt von einer exogenen, im zweiten von einer endogenen Psychose. Selbstmordversuche sind meist Folgen solcher Störungen. Das gilt insbesondere bei Kindern und Jugendlichen, bei denen Suizid knapp hinter Unfällen als zweithäufigste Todesursache rangiert. Kurze psychotische Störungen können per Definition einen Tag anhalten, aber stets weniger als einen Monat. In dieser Zeit ist die Selbst- oder Fremdgefährdung besonders hoch.

In den Sammeltopf »Psychose« gehört die Schizophrenie des suizidalen Bauern, aber auch das Delir: Der Patient ist verwirrt, seine kognitiven Fähigkeiten wie auch seine Stimmung schwanken stark. Häufig sind es ältere Menschen, zu denen der Notarzt gerufen wird, mitunter aber auch junge im Drogenentzug oder Alkoholrausch.

Normal oder psychotisch?

Eine weitere häufige Erkrankung, die mit psychotischen Phasen einhergehen kann, ist die so genannte bipolar-affektive Störung; sie treibt das Opfer in einem Wechselbad von Depression und Manie umher. In der depressiven Episode erscheint das Leben perspektivlos, der Tag beginnt meist mit einem Morgentief, Nachtschlaf ist häufig nicht möglich. Psychosomatische Beschwerden wie Kopfschmerzen oder Magen-Darm-Verstimmungen steigern das Leid weiter. Angst bis zur Panik, Suizidneigung und Autoaggression veranlassen Mitmenschen oft, den Notarzt zu rufen. Auch der andere Pol der Störung, die manische Episode mit ihrer unkontrollierbaren Erregung und Überaktivität, kann dessen Eingreifen erfordern. Kommt der Patient nicht mehr zur Ruhe, verfällt er auch zunehmend körperlich und benötigt eine medikamentöse Ruhigstellung.

Nicht immer sind die Symptome so deutlich. Darf der Notarzt einen Handwerker in eine psychiatrische Klinik einweisen, weil der sich einen mit Blattgold belegten Sportwagen bestellt? Oder jemanden, der sein Erbe im Bordell durchbringt, statt damit die Schuldenlast seiner Familie zu tilgen? Muss eine Frau, die mit Tomaten um sich wirft, damit alles rot erscheint, psychotisch sein?

Häufig lösen organische Ursachen die psychiatrischen Störungen aus oder verstärken sie zumindest. Dazu gehören Vergiftungen, Entzündungen und Infektionen, Tumorerkrankungen oder hohes Fie- ▷

Suizid und Suizidversuch gehören zu den häufigsten psychiatrischen Notfällen. In Deutschland nehmen sich 14000 Menschen pro Jahr das Leben.

ber. Auch krankhafte Stoffwechselprozesse gehören dazu, angefangen von der Schilddrüsenfehlfunktion über die Zuckerkrankheit bis zum Morbus Wilson, einer seltenen Störung des Kupferstoffwechsels.

Zum Spektrum dieser Notfälle gehören schließlich auch Angstzustände, akute Folgen des Alkoholmissbrauchs und Entzugserscheinungen. Besonders problematisch sind so genannte Erregungszustände, da der Patient nicht kooperiert und in seinem Verhalten oft nicht berechenbar ist.

Je genauer die Diagnose, desto besser die medizinische Notversorgung. Doch die Möglichkeiten des Notarztes sind beschränkt – es fehlt auch schlicht die Zeit. Die Einweisung in eine nervenärztliche Fachklinik liegt deshalb oft im Interesse des Patienten wie auch seiner Umgebung, muss aber mitunter gegen seinen Willen durchgesetzt werden.

Psychiatrische Notfälle sind keineswegs selten. So ergab eine Auswertung von Notarztprotokollen aus Hamburg, dass im Jahr 1995 fast zehn Prozent der Einsätze auf eine psychiatrische Störung zurückzuführen waren. Daran hatte Alkoholismus einen Anteil von mehr als einem Drittel der Fälle, Erregungszustände und Suizidalität lagen jeweils bei mehr als zwanzig Prozent. Angesichts solcher Zahlen erstaunt es, dass der psychiatrische Notfall bislang kaum ein Thema für die Forschung ist. Der Bedarf wäre vorhanden, allein schon, um die Diagnostik zu optimieren. Während ein Schlaganfall durch entsprechende bildgebende Verfahren genau untersucht werden kann, bleibt in der Beurteilung psychischer Erkrankungen immer ein Ermessensspielraum. So auch in unserem Beispielszenario, das auf einem wahren Fall beruhte: Kurz nach seiner Entlassung aus der Klinik hat sich der Bauer erhängt. Die mittlere Lebenserwartung Schizophrener liegt unter sechzig Jahren. ◁

Pablo Hagemeyer absolviert seine Ausbildung zum Facharzt an der Psychiatrischen Klinik Garmisch-Partenkirchen. Er betreibt zudem The DOX, eine medizinisch-naturwissenschaftliche Medienberatungsfirma.

Literaturhinweise

Psychiatrische Notfälle im Notarztdienst einer deutschen Großstadt. Von F. G. Pajonk et al. in: Fortschritte in der Neurologischen Psychiatrie, Heft 69, 2001, S. 170.

Der psychiatrische Notfall. Von H. Berzewski, Springer 1996, 2. Auflage.

Weblinks zum Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

UNFALLFORSCHUNG

Was steuert uns, wenn wir am Steuer sitzen?

Der Airbag löst nicht alle Probleme im Straßenverkehr: Forscher suchen nach den psychologischen Randbedingungen tödlicher Unfälle.

Von Julia Seifert und Axel Ekkernkamp

Ein erwachsener Mann befährt eine Strecke, die er seit langem täglich mehrmals zurücklegt. Obwohl er alle Kurven und Gefahrenpunkte genau kennt, kommt sein Fahrzeug von der Straße ab und prallt gegen einen Baum. Der Fahrer stirbt noch am Unfallort. Hatte er, übermüdet vielleicht, falsch reagiert? War sein Tempo zu hoch gewesen, sodass weder Knautschzone noch sonstige Sicherheitseinrichtungen sein Leben retten konnten? Oder haben diese Systeme versagt? Welche seiner Verletzungen waren letztlich tödlich?

Mit derartigen Fragen beschäftigen sich Ärzte, Verkehrspsychologen und Unfallanalytiker in Europa und den USA seit etwa fünfzig Jahren. Als Mittel der Forschung dienen Crashtests mit Leichen und Dummys (SdW 9/1997, S. 90 und 9/1999, S. 54) sowie »In-Depth-Investigation-Studies«. In diesen Erhebungen sollen alle Aspekte eines Crashs zusammengetragen werden, wie Wetterbedingungen, Straßengestaltung sowie Schäden an Insassen und Fahrzeug.

An der Ernst-Moritz-Arndt-Universität in Greifswald versuchen wir seit Januar 2001 erstmals in Europa, auch psychologische Aspekte der Unfallentstehung miteinzubeziehen. Zudem erfragen wir die Ergebnisse der medizinischen Behandlung von Verletzten. Ziel des Projekts ist eine effektive Unfallprävention.

Schon jetzt können wir sagen, dass mehr als neunzig Prozent aller tödlich verlaufenden Unfälle eine nahe liegende und doch von vielen verdrängte Ursache haben: zu schnelles Fahren. Dabei wurden nicht nur die Überschreitung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit berücksichtigt, sondern auch äußere Umstände wie Nebel oder Regen, die eine langsamere Fahrweise verlangt hätten. Betrachtet man die Gesamtheit aller Verkehrsunfälle, zeigt sich ein Unterschied der Geschlechter: Sind Männer die Schuldigen, waren sie meist schneller als erlaubt gefahren, während Frauen signifikant häufiger die Vorfahrt missachten.

Interessant ist in diesem Zusammenhang auch die Auswertung der psychologischen Daten. Männer und Frauen unter-

Ein 26-Jähriger brachte sich und seinen Beifahrer zu Tode. Die Unfallursache verdeutlicht dieser Aufkleber.

UNIVERSITÄT GREIFSWALD

scheiden sich nicht in ihrer allgemeinen Bereitschaft, Risiken einzugehen, wohl aber hinsichtlich der konkreten Ausprägung: Während Männer beim Autofahren eher Aufregung und Abenteuer suchen, wollen Frauen stärker Grenzen auszutesten: Lässt sich eine Kurve nicht doch etwas schneller nehmen als erlaubt? Ab welcher Geschwindigkeit beginnt der Wagen auszubrechen?

Auf einen Geschlechterunterschied deutet auch die bisherige Auswertung von Fragen zur Lebensqualität nach einem Unfall. Frauen klagen demnach häufiger unter körperlichen Beschwerden als Folge ihrer Verletzungen. Da ihnen das Unfallgeschehen öfter ins Bewusstsein tritt, als das bei Männern der Fall ist, wäre eine mögliche Deutung: Frauen fällt es schwerer, ihre psychische Traumatisierung zu verarbeiten, sie reagieren mit psychosomatischen Beschwerden. Weniger überraschen dürfte, dass Menschen, älter als 35 und Unfallopfer, die mehrere Verletzungen erlitten haben, häufiger über bleibende Einschränkungen der Lebensqualität klagen als jüngere beziehungsweise einfach verletzte.

Die vorläufigen Daten ermöglichen es uns bereits, das Ziel »Prävention« konkret anzugehen. Beispielsweise haben wir das Konzept entwickelt, durch einen speziellen Straßenbelag Autofahrer zur Verringerung der Geschwindigkeit zu veranlassen – fährt er schneller als die zulässige Höchstgeschwindigkeit, muss er Lärm und Vibrationen ertragen. Der Belag soll an Unfallschwerpunkten außerhalb geschlossener Ortschaften eingesetzt werden. Gelingt es, die Finanzierung sicherzustellen, wird das Institut für Straßenwesen der Technischen Universität Berlin diesen Belag entwickeln. Gemeinsam mit dem Deutschen Verkehrssicherheitsrat, dem Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur sowie den Landesschulämtern wollen wir auch die Verkehrserziehung anhand unserer Studie verbessern. Wir denken beispielsweise daran, diese Unterweisung stärker auf Geschlecht und Alter abzustimmen. Verknüpft mit einer Gesundheits-, Sozial- und Sicherheitserziehung könnte ein solcher Unterricht auch benotet werden, um Leistungsanreize zu geben. ◁

Julia Seifert ist Unfallchirurgin und leitet die Studie an der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald. **Axel Ekkernkamp** ist ordentlicher Professor für Unfallchirurgie an dieser Universität und Direktor der Klinik für Unfall- und Wiederherstellungschirurgie des Unfallkrankenhauses Berlin.

SCHLAGANFALL

Die Uhr tickt

Wenn Hirnzellen bei einem Schlaganfall in Not geraten, bleibt dem Arzt nicht viel Zeit. Neue Wirkprinzipien sollen das therapeutische Fenster vergrößern.

Von Claudia Eberhard-Metzger und Michael G. Hennerici

In voll saftiger Wut, prallrot das Gesicht von aufwallendem Blut und dick die Adersträhnen an den Schläfen« kommt Georg Friedrich Händel am 13. April des Jahres 1737 von der Probe. Mit einem Knall wirft der 52-Jährige die Haustür hinter sich zu, läuft zornig die Treppe hinauf und stapft heftig in seinem Arbeitszimmer auf und ab. Plötzlich erbebt das Haus von einem dumpfen Schlag. »Etwas Massiges und Schweres musste im obern Stockwerk hingeschmettert haben«, schreibt Stefan Zweig in seiner Erzählung »Georg Friedrich Händels Auferstehung«. Ein Diener habe seinen Herrn gleich darauf »regungslos auf dem Boden liegend, die Augen starr offen« vorgefunden. Der rasch herbeigerufene Arzt braucht nicht lange, um zu erkennen, was sich ereignet hat: »Apoplexia«, sagt er, »die rechte Seite ist gelähmt.« Und auf die bange Frage, ob der Hofkomponist je wieder genesen wird, antwortet er: »Vielleicht. Alles ist möglich.«

Georg Friedrich Händel wird wieder gesund. Ob die heißen Bäder in Aachen dazu beigetragen haben oder die Konstitution des Komponisten, den Stefan Zweig als stark wie ein Stier beschreibt, lässt der Dichter offen. »Nach einer Woche jedenfalls konnte sich Händel schon wieder hinschleppen, nach einer zweiten den Arm bewegen.« Der Komponist schuf nach der Genesung den Großteil seiner Werke. Er soll etwa so viele Noten zu Papier gebracht haben wie Bach und Beethoven zusammen.

Aus heutiger medizinischer Sicht muss Händel wohl jener Gruppe von Menschen zugerechnet werden, bei denen sich infolge einer Gefäßerkrankung und vieler Risikofaktoren wie Bluthochdruck, Stress und Übergewicht ein Schlaganfall, fachlich Apoplex, mit vollständiger Spontanheilung ereignet hat. Das ist die Ausnahme, nicht die Regel: Vierzig bis fünfzig Prozent aller Schlaganfälle gehen unbehandelt mit bleibenden Funktionsstörungen einher oder führen in schweren Fällen (zehn bis zwanzig Prozent) innerhalb der ersten vier Wochen nach dem Ereignis zum Tode. Von mehr als 200 000 Menschen, die pro Jahr in Deutschland einen Schlaganfall erleiden, stirbt jeder Fünfte. Nicht nur ältere, sondern zunehmend auch jüngere Menschen »trifft der Schlag«, der sich plötzlich mit halbseitiger Schwäche und Gefühlsstörung, Verlust der Sprache, des Sprachverständnisses oder Sehstörungen bemerkbar machen kann. Risikofaktoren sind Rauchen, hoher Blutdruck, Fettstoffwechselstörungen, Zuckerkrankheit, mangelnde Bewegung, Übergewicht, Stress und Herzrhythmusstörungen. Zudem wächst das Risiko mit höherem Lebensalter drastisch an.

Anders als zu Händels Zeiten müssen Patienten heute nicht mehr allein auf die ▷

Der Komponist Georg Friedrich Händel (1685–1759) erlitt im Alter von 52 Jahren einen Schlaganfall als Folge seiner exzessiven Lebensführung, erholte sich aber wieder vollständig. Zu seiner Zeit war eine solche Genesung wohl eher die Ausnahme. Heute verfügt die Medizin über geeignete Therapien.

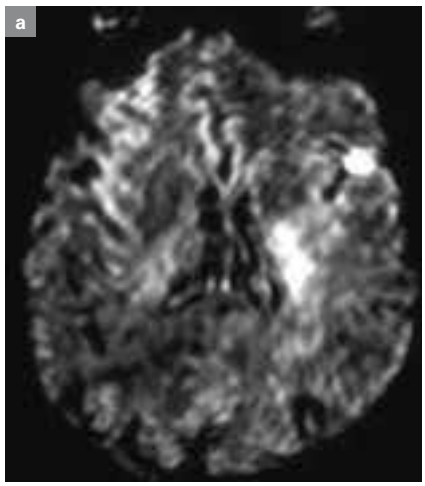
AKG BERLIN

▷ Gunst des Schicksals oder die Selbstheilungskräfte des Körpers hoffen. Die Mediziner verfügen inzwischen über exzellente Methoden, mit denen sie in den lebenden Körper hineinblicken können, um die Ursache und die Abläufe eines Schlaganfalls im Detail zu erkennen. Auch stehen mittlerweile Medikamente zur Verfügung, die sehr gut wirken – sofern sie früh genug verabreicht werden. Die Forschung arbeitet darüber hinaus an Wirkstoffen, die Hirnzellen vor dem Untergang bewahren sollen. Die Rehabilitation kennt seit wenigen Jahren Therapieverfahren, um selbst verloren gegangene Hirnleistungen noch Monate nach dem Schlaganfall zu reaktivieren. Wie für Diagnose und Ersttherapie gilt auch hier: Je früher, desto besser. Dreh- und Angelpunkt der Erstversorgung und Koordination in der Akutphase des Schlaganfalls sind die »Stroke Units« – so heißen moderne »Schlaganfall-Stationen«, von denen es in deutschen Kliniken bereits mehr als hundert gibt.

Das therapeutische Fenster öffnen

Ursache eines Schlaganfalls ist meist ein Blutpfropf (fachlich Thrombus) in einer durch Arteriosklerose vorgeschädigten Hirnarterie oder ein Blutgerinnsel, das aus dem Herzen oder einer großen Schlagader in das Gehirn gespült wird (fachlich Embolie). Etwa zwanzig Prozent der Schlaganfälle entstehen in Folge einer Hirnblutung. Dabei platzen angeborene Ausstülpungen der Hirngefäße oder kleine Arterien, die durch Bluthochdruck und Diabetes jahrelang geschädigt wurden, schlagen leck. Gerade bei mehrfach auftretenden Schlaganfällen kommen viele Ursachen zusammen.

Vorsicht, Nahrung gefährdet Ihre Gesundheit!



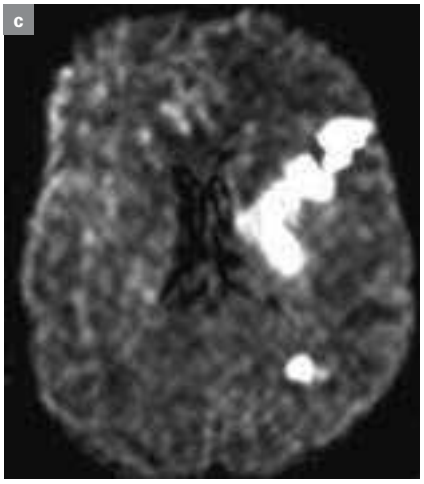
In jedem Fall aber werden Teile des Gehirns »schlagartig« außer Funktion gesetzt, die Hirnzellen (fachlich Neuronen) erhalten nicht mehr genügend Sauerstoff und Nährstoffe und drohen abzusterben. Je länger dieser Zustand andauert, desto unwiderruflicher sind die Folgen. Ein Apoplex ist deshalb immer ein Notfall, der sofortiger ärztlicher Behandlung in einer neurologischen Klinik bedarf, am besten in einer Stroke Unit mit einem geschulten Team aus Ärzten, Pflegekräften und medizintechnisch versierten Mitarbeitern. Je früher die Therapie einsetzt, desto größer ist die Chance, gefährdetes Hirngewebe zu retten. »Time is Brain« bringt der Slogan einer amerikanischen Aufklärungskampagne die Bedeutung der Zeit für das Überleben und die Lebensqualität der Betroffenen auf den Punkt.

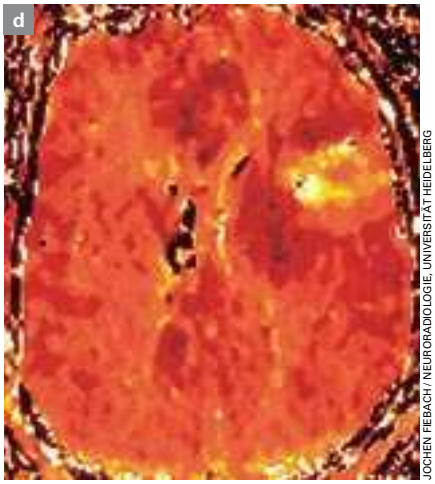
Zur optimalen Therapie muss der Arzt die Ursache klären. Im Computertomogramm kann er erkennen, ob ursächlich eine Blutung (fachlich Hämorrhagie) oder eine Mangeldurchblutung (fachlich Ischämie) vorliegt. Die Magnetresonanztomografie hilft, in der Hochakutphase das Ausmaß des bereits eingetretenen Schadens und die Überlebenswahrscheinlichkeit der Nervenzellen noch besser abzuschätzen. Mit Ultraschall gelingt es des Weiteren, Gefäßveränderungen und -verstopfungen der Hirnarterien zu erkennen sowie ihren Ursprung auszumachen.

Liegt eine Hirnblutung vor, muss die Leckstelle operativ verschlossen werden. Ist hingegen die Blutzirkulation durch einen Pfropf verschlossen, versucht man das blockierte Gefäß mit einem Medikament – einem gentechnisch hergestellten »Gewebeplasminogenaktivator« (rtPA) – wieder durchgängig zu machen. Der Wirkstoff, der den blockierenden Blutpfropf auflösen kann, wird in eine Vene, in Ausnahmefällen auch direkt in die Arterie gespritzt. Die Mediziner sprechen von einer »Lyse« (griechisch für »auflösen«). Sie muss nach den derzeit geltenden Regeln innerhalb der ersten drei Stunden nach den ersten Symptomen erfolgen. Danach verringern sich die Aussichten, das Ausmaß des Schlaganfalles und seine Folgen wesentlich zu begrenzen, während die Gefahr unerwünschter Nebenwirkungen steigt.

Neuere Untersuchungen lassen hoffen, dieses »therapeutische Fenster« zu vergrößern. Beispielsweise scheint es möglich, mit geringeren Dosen des Gewebeplasminogenaktivators die gewünschte Wirkung zu erzielen, sofern eine spezielle Ultraschallbehandlung die Therapie stützt. Das bedeutet: Der Wirkstoff lässt sich über einen längeren Zeitraum als die genannten drei Stunden verabreichen, ohne dass als Nebenwirkung Blutungen auftreten.

Dem raschen Einsatz aller derzeit verfügbaren medizinischen Methoden, sei es in der Akuttherapie, in der Vorbeugung





JOCHEN FIEBACH / NEURORADIOLOGIE, UNIVERSITÄT HEIDELBERG

Etwa zweieinhalb Stunden nach den ersten Symptomen wurde das Kernspintomogramm a aufgenommen. Es misst die Wasserdiffusion im Gehirn. Deutlich zeichnet sich darin der tote Infarktkern ab. Durch Gewichtung der Bilddaten mit der ebenfalls gemessenen Durchblutung entstand Bild b, das auch die noch lebende, aber unterversorgte Übergangszone darstellt. Zwanzig Stunden nach der Auflösung des verursachenden Blutgerinnsels ist der Infarktkern kaum gewachsen (c), die einstige Übergangszone (d) aber wieder durchblutet.

weiterer Anfälle oder zur Rehabilitation, ist es zu verdanken, dass heute jeder zweite Patient ohne neurologische oder psychische Funktionseinbußen nach Hause entlassen werden kann. Wenn es gelänge, diejenigen Gehirnzellen, die von der Blutzufuhr zeitweilig abgeschnitten sind, mit Hilfe von Medikamenten bei allen Patienten vor dem Absterben zu schützen, könnten noch bessere Ergebnisse erzielt werden. Das ist eines der Ziele der aktuellen Schlaganfall-Forschung, die derzeit mehrere Ansätze verfolgt.

Wenn der Blutstrom und mit ihm die Versorgung versiegt, sterben die davon unmittelbar betroffenen Nervenzellen nach kürzester Zeit unwiderruflich ab – im Zentrum der Minderdurchblutung innerhalb weniger Sekunden bis Minuten. Um diesen Infarktkern herum liegen die Hoffnungsträger künftiger Therapien: ein Saum von Zellen, deren Sauerstoff- und Nährstoffversorgung gerade noch ausreicht, um ihre Zellstrukturen intakt zu halten. In der Fachsprache heißt diese Übergangszone »Penumbra«, Schattenzone.

Schlafende Neuronen wecken

Deren Nervenzellen, das wissen die Hirnforscher heute, befinden sich in einer Art Dornröschenschlaf, aus dem sie erwachen können, sobald ihnen wieder genügend Sauerstoff und Nährstoffe angeboten werden. Die »Zeit der Erweckbarkeit« ist jedoch ungleich kürzer als im Märchen, weil auch in dieser Region von Sekunde zu Sekunde mehr Zellen sterben. Hält die Mangelversorgung an, wächst der Infarktkern, und die Chancen auf eine klinische Erholung schwinden. Doch neue Wirkstoffe haben zumindest im Labor den Prozess verlangsamen beziehungsweise das Erwachen der Penumbra-Zellen fördern können. Bisher gelang es den Wissenschaftlern allerdings noch nicht, diese Ergebnisse der Grundlagenforschung in die Klinik zu übertragen.

Eine zusätzliche Form zellulären Sterbens, der »programmierte Zelltod« (fachlich Apoptose), bedroht selbst noch Tage nach dem Schlaganfall die Patienten. Die Apoptose ist ein von der Natur in jede einzelne Zelle eingebautes Programm, das abläuft, sobald sie von äußeren Signalen zum »Selbstmord« aufgefordert wird. Auf diese Weise entledigt sich der Körper etwa verbrauchter oder krankhaft veränderter Zellen auf kontrollierte und unauffällige Weise. Nach einem Schlaganfall schütten die zugrunde gehenden Zellen leider vermehrt Entzündungsstoffe und Stoffwechselprodukte aus, die ihre Nachbarzellen fälschlicherweise in den Selbstmord treiben. Substanzen, die dieses unnötige Zellsterben aufhalten und funktionstüchtiges Hirngewebe erhalten, sind die Hoffnung all derjenigen Patienten, deren Schlaganfall nicht sofort behandelt werden konnte oder die trotz frühzeitigen Eintreffens in einer Stroke Unit wegen individueller Besonderheiten nur eingeschränkt zu therapieren waren.

Zu guter Letzt interessieren sich Schlaganfallforscher sehr für die erstaunliche Plastizität des Gehirns – seine Fähigkeit, sich selbst zu helfen. Denn der Schlaganfall wird vom Gehirn nicht passiv hingenommen; er veranlasst vielmehr aktiv gegensteuernde und kompensatorische Maßnahmen. Um Schäden auszugleichen, übernehmen beispielsweise Zellen weit außerhalb des betroffenen Areals Aufgaben der untergegangenen Neuronen. Auf diese Weise stellen benachbarte Hirnareale verlorene Funktionen wieder her oder vertreten die Zellen im Infarktgebiet so lange, bis diese sich regeneriert haben. Auch dass Dendriten – die astartigen Fortsätze von Nervenzellen – auswachsen und neue Verbindungen knüpfen, dass sich neue Synapsen, also Kontaktstellen zwischen Nervenzellen, und selbst einzelne Neurone neu bilden können, haben Wissenschaftler beobachtet.

Abwarten oder vorbeugen?

Die Bereitschaft des Gehirns, sich neu zu organisieren, ist unmittelbar nach einem Schlaganfall besonders groß. Im Verlauf der nachfolgenden Monate nimmt sie langsam wieder ab. Die Selbstheilungskräfte des Gehirns mit Hilfe von Medikamenten oder gezielten Trainingsmaßnahmen zu stimulieren, ist ein weiteres anspruchsvolles Ziel einer Schlaganfall-Therapie der Zukunft.

Bis es soweit ist, bleibt der Schlaganfall eine der dramatischsten Krankheiten, die vielen Menschen das Leben kostet oder sie hilfsbedürftig werden lässt. Durch bessere Information der Bevölkerung, so die Hoffnung, könnte ihre Bereitschaft wachsen, Risikofaktoren wie ungesunde Ernährung zu meiden und die Akutzeichen des Schlaganfalls zu beachten. Ohne das kontinuierliche Engagement von Rettungssanitätern, Notärzten und Klinikpersonal in speziellen Schlaganfallzentren und deren Unterstützung durch die für ein modernes Gesundheitssystem Verantwortlichen nutzt der medizinische Fortschritt seit Georg Friedrich Händel nichts: Dr. Jenkins, der Arzt des königlichen Hofkomponisten, eilte damals zwar so schnell er konnte zu seinem Patienten. Dort konnte er aber nur abwarten, bis die Symptome – möglicherweise – wieder verschwanden. ◁

Claudia Eberhard-Metzger ist Wissenschaftsjournalistin mit dem Arbeitsschwerpunkt angewandte biowissenschaftliche Grundlagenforschung. **Michael G. Hennerici** leitet die Neurologische Klinik des Universitätsklinikums Mannheim.

Roboter steuern von Geistes Hand

Ein Roboterarm bewegt sich nach den Kommandos eines lebenden Gehirns. Was nun mit Affen gelungen ist, könnte körperlich behinderten Menschen eines Tages zu mehr Freiheit verhelfen.

Von Miguel A. L. Nicolelis
und John K. Chapin

JIM WALLACE / DUKE UNIVERSITY PHOTOGRAPHY

Belle, unsere kleine Nachtaffendame, hockt auf ihrem Spezialstuhl in einer schalldichten Kammer unseres Labors an der Duke-Universität in Durham (North Carolina). Ihre rechte Hand fest auf einem Joystick, den Blick geradeaus auf eine Anzeigetafel unmittelbar vor ihr, wartet sie auf ihren Einsatz. Jedes Mal, wenn ein Lichtsignal rechts oder links aufleuchtet und sie den Joystick dann entsprechend bewegt, bekommt sie aus einem Flüssigkeitsspender einen Tropfen Fruchtsaft ins Maul geträufelt. Belle liebt dieses Spiel, und sie beherrscht es hervorragend.

Auf ihrem Kopf klebt eine verkabelte Kappe mit Kunststoffsteckern an der Innenseite. Verbunden sind sie mit einer rasterartigen Anordnung von Mikroelektroden aus hauchdünnem Draht, feiner noch als ein Haar (Foto im Kasten Seite 76). Implantiert hatten wir die Multi-Mikroelektroden-Arrays, wie der technische Ausdruck auch lautet, in verschiedene Regionen von Belles motorischer Hirnrinde. Die »angezapften« Bereiche planen Bewegungsabläufe und schicken Befehle an Nervenzellen im Rückenmark, um die Bewegungen ausführen zu lassen. Jedes der insgesamt 96 Drähtchen kam neben einer motorischen Nervenzelle im Gehirn zu liegen.

Sobald ein solches »Motoneuron« aktiv wird, erfasst die benachbarte Mikroelektrode seine elektrische Aktivität und leitet sie nach außen weiter. Von Belles Kappe führt ein dünnes Kabel zu einer Elektronik-Box gleich außerhalb der schalldichten Kabine. Die Box wiederum ist über einen Server mit zwei Computern verbunden: Der eine steht in der gleichen Etage, der andere hingegen Hunderte von Kilometern entfernt.

Auf der gegenüberliegenden Seite des Flures, in einem überfüllten Raum, steigt die Anspannung bei unserem Forschungsteam sichtlich. Nach Monaten harter Arbeit ist die Stunde der Wahrheit gekommen. Würde es gelingen, die elektrische Aktivität im Gehirn eines Lebewesens – Belles bloße Gedanken sozusagen – zuverlässig in Steuersignale für einen Roboter zu übersetzen? Was Belle an diesem Nachmittag im Frühjahr 2000 nicht sehen kann: Wir hatten in unserem Raum einen mehr-

Die Nachtaffendame Belle klettert auf dem Roboterarm herum, den sie über ihr Gehirn in Echtzeit fernsteuerte.

gelenkigen Roboterarm aufgebaut, den sie zum ersten Mal – ohne etwas davon zu ahnen – steuern würde.

Sobald Belles Gehirn auf einen aufleuchtenden Punkt der Anzeigetafel anspricht, sollte die Elektronik in der Box in Echtzeit die winzigen Signale der Nervenzellen analysieren, die über die beabsichtigte Armbewegung Auskunft geben. Wir hatten dafür zwei mathematische Modelle entwickelt und erprobt. Unser Laborcomputer würde dann die elektrischen Muster in Befehle umwandeln, die den Roboterarm steuern. Tausend Kilometer weiter nördlich, in Cambridge (Massachusetts), würde ein zweiter Computer einen andersartigen Roboterarm in derselben Weise agieren lassen. Konstruiert hatte ihn Mandayam ▷

IN KÜRZE

- **Affen steuern inzwischen erfolgreich Roboterarme**, indem sie sich vorstellen, wie sie mit ihrem eigenen Arm einen Joystick bewegen. Ihr Gehirn wird dazu über ein spezielles Interface mit einem Computer verdrahtet. Selbst Ratten bewältigen ähnliche Aufgaben.
- Fortschritte bei der **Entwicklung von Mikroelektroden und Algorithmen** haben dieses Kunststück ermöglicht. Drahtartige Mikroelektroden, gebündelt zu so genannten Arrays, können in verschiedene **motorische Teile der Hirnrinde** implantiert werden. Geeignete Rechenvorschriften »übersetzen« die elektrischen Aktivitäten der Nervenzellen im Gehirn dann in Steuerbefehle für mechanische Apparate.
- Noch ist man weit davon entfernt, hoch entwickelte **Gehirn-Maschine-Interfaces am Menschen** zu erproben. Diese Technik könnte jedoch einmal Menschen nach Verlust eines Armes ermöglichen, ersatzweise einen Roboterarm kraft ihrer Gedanken zu steuern. **Querschnittgelähmten** kann sie vielleicht dazu verhelfen, gelähmte Gliedmaßen wieder kontrolliert zu bewegen.

▷ A. Srinivasan, Leiter des Labors für Haptik von Mensch und Maschine, am Massachusetts Institute of Technology.

Wenn alles nach Plan läuft, müssten sich die beiden Roboterarme wie Belles Arm verhalten und synchron mit ihm bewegen. Um die neuronale Aktivität von Belle in Roboterbefehle umzusetzen, bleiben gerade 300 Millisekunden. Dies ist die natürliche Spanne zwischen dem Zeitpunkt, an dem Belles motorische Hirnrinde geplant hat, wie sich ihr Arm bewegen soll, und dem Moment, in dem die Instruktionen an die Muskeln gehen. Bedenkt man zudem, dass die Signale bei der Übertragung in unserem Labornetz und in dem störanfälligen Internet verrauscht und verzögert werden, ist die Aufgabe alles andere als einfach. Wenn dennoch das Gehirn eines Lebewesens auf diesem Wege zwei unterschiedliche Roboterarme präzise dirigieren könnte, dann wären vielleicht eines Tages auch Prothesen oder sogar gelähmte Gliedmaßen entsprechend zu steuern.

Endlich ist es soweit. Wir schalten die Lämpchen vor Belle in beliebiger Reihenfolge mal rechts, mal links an und aus, worauf sie sofort ihren Joystick dementsprechend hin- und herkippt. Unser Roboterarm bewegt sich tatsächlich ähnlich wie Belles Arm, und das tut auch Srinivasans Roboterarm. Alle drei »tanzen« synchron nach der Choreografie des elektrischen Feuerwerks, das Belles Geistesarbeit entspringt. Lautstarker Jubel bricht in Durham und Cambridge aus – auch wenn uns nur allzu bewusst ist, dass wir erst am Anfang eines viel versprechenden Weges stehen.

Seit diesem Experiment im Jahr 2000 hat der wissenschaftlich-technische Fortschritt in den Neurowissenschaften, der Informatik, der Mikroelektronik und Ro-

Der Versuchsaufbau an Belles großem Tag

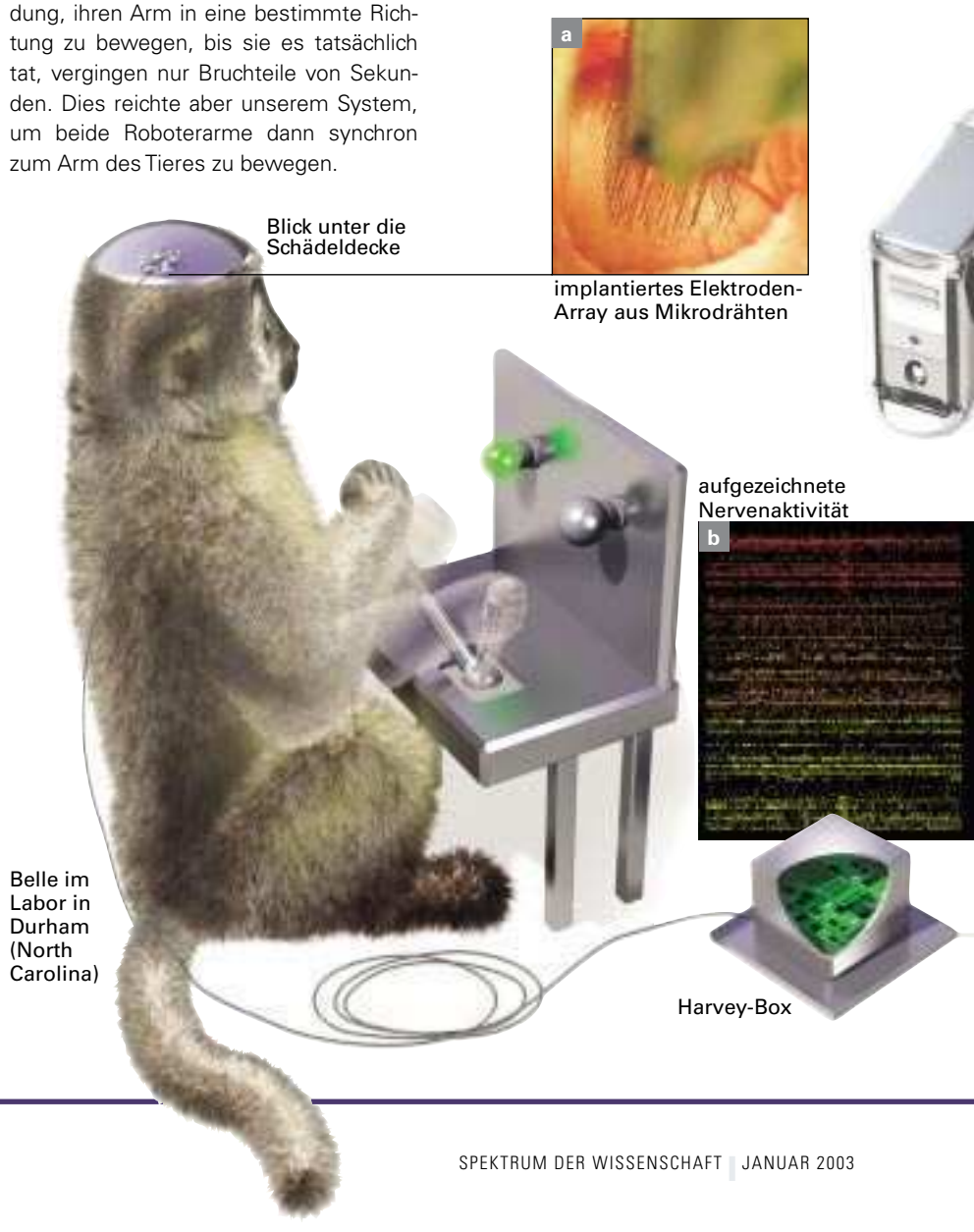
Tanz der Roboter

Als Belle erstmals einen mehrgelenkigen Roboterarm kraft ihrer Gedanken bewegte, geschah dies ohne ihr Wissen. Auf ihrem Kopf war eine Kappe mit vier innenliegenden Kunststoffsteckern festgeklebt. Die Verbindungen führten zu je einem so genannten Array feinster Drahtelektroden in verschiedenen motorischen Bereichen der Hirnrinde (a).

Belle war darauf dressiert, einen Joystick sofort zu der Seite zu lenken, auf der sie ein Licht aufleuchten sah. Die Mikroelektroden griffen elektrische Signale ab, die der eigentlichen Bewegung vorausgingen und von aktivierten Neuronen in der Hirnrinde stammten. Übermittelt wurden diese Signale per Kabel an eine »Harvey-Box«. Das nach dem Vornamen ihres Erfinders benannte elektronische Gerät erfasste, filterte und verstärkte sie und gab sie dann an einen Server in einem Nachbarraum weiter.

Die Signale, die in der Box einlaufen, lassen sich als so genannter Raster-Plot darstellen (b): Jede Zeile repräsentiert die Aktivität eines einzelnen Neurons während der gemessenen Zeitspanne; jeder senkrechte Zacken darin zeigt an, dass das Neuron in diesem Moment gerade »feuerte«. Oft traten ganze Salven von Nervenimpulsen auf.

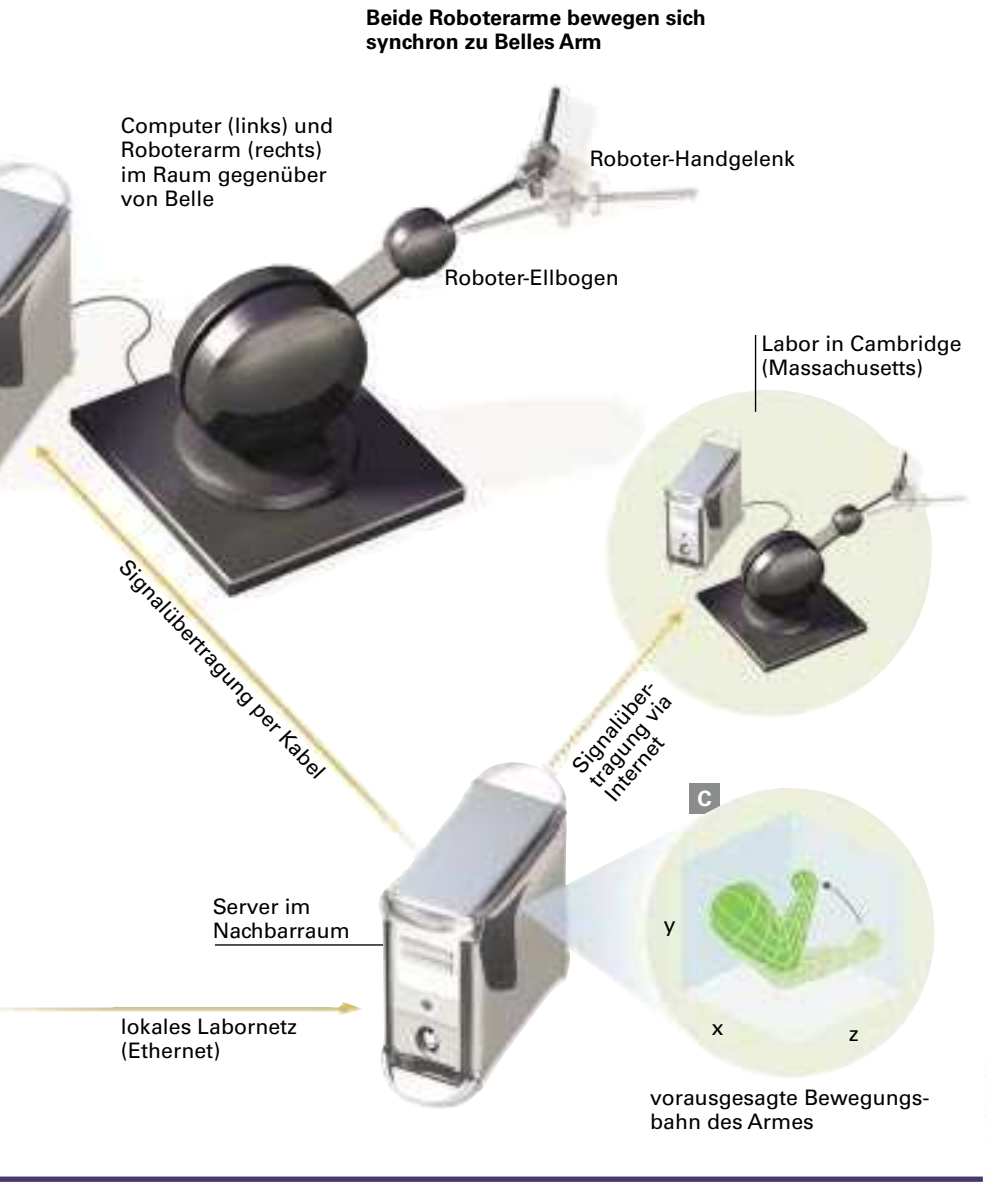
Der Computer sagte die Bewegungsbahn voraus, die Belles Arm beschreiben würde, und setzte diese Information in Befehle um, welche dieselbe Bewegung in einem Roboterarm hervorrufen sollten (c). Anschließend schickte der Rechner diese Befehle an zwei andere Computer. Der erste stand in einem Raum gegenüber, der zweite in einem Labor tausend Kilometer entfernt. Jeder steuerte einen eigenen Roboterarm. Von Belles Entscheidung, ihren Arm in eine bestimmte Richtung zu bewegen, bis sie es tatsächlich tat, vergingen nur Bruchteile von Sekunden. Dies reichte aber unserem System, um beide Roboterarme dann synchron zum Arm des Tieres zu bewegen.



botik uns und andere Forscher dem gesteckten Ziel noch ein Stück näher gebracht: Allein durch »bloßes Vorstellen« des nötigen Bewegungsablaufs – durch Geistes Hand quasi – sollen Menschen mechanische und elektronische Geräte steuern können. In erster Linie geht es dabei um Patienten, die zwar gelähmt sind, aber über eine intakte motorische Hirnrinde verfügen. Wer beispielsweise vom Hals abwärts querschnittgelähmt ist, könnte so einmal einen Rollstuhl oder einen Roboterarm bedienen. Eines Tages gewinnt er vielleicht sogar die Kontrolle über seine eigenen Arme und Beine zurück – mit Hilfe drahtloser Kommunikation zwischen Implantaten im Gehirn und in den Gliedmaßen. Diese Forschungen könnten auch zur Entwicklung von Geräten führen, die andere motorische sowie sensorische oder kognitive Funktionen wiederherstellen oder unterstützen.

Bis heute ist es der Medizin nicht gelungen, Nervenbahnen im Rückenmark oder im Gehirn zu reparieren. Neurowissenschaftler versuchen zwar, den dort unterbrochenen Nervenfasern ein Nachwachsen zu ermöglichen oder Stammzellen in Ersatzneuronen zu verwandeln. Bis zu einer Therapie ist es aber noch weit. Für die nähere Zukunft bieten deshalb Gehirn-Maschine-Schnittstellen, kurz Neuroprothesen, eher eine Chance, motorische Funktionen wiederherzustellen. Ein weiterer Schritt in diese Richtung ist uns im Sommer letzten Jahres bei Rhesusaffen gelungen, die andere Aufgaben als Belle zu bewältigen hatten.

Die Entwicklungen der letzten Jahre basieren zum Teil auf Entdeckungen, die etwa zwanzig Jahre zurückliegen. Anfang der 1980er Jahre untersuchte Apostolos P. Georgopoulos an der Johns-Hopkins-Universität in Baltimore, wie sich Neuronen in der motorischen Hirnrinde von Rhesusaffen verhalten, wenn diese einen Arm in verschiedene Richtungen bewegen wollen. Wie er feststellte, »bevorzugt« eine solche Zelle zwar gewöhnlich eine bestimmte Zielrichtung. Erkennbar ist dies an den dichten Salven von Nervenimpulsen, die sie abfeuert, wenn der Arm genau dorthin gehen soll. Ist eine abweichende Richtung geplant, verstummt die Nervenzelle aber nicht einfach, sondern vermindert ihre Aktivität nur proportional zum Cosinus des Abweichwinkels.



BRYAN CHRISTIE DESIGN

Im Kollektiv aktiv

Motoneuronen sind somit auf einen recht breiten Bewegungsbereich abgestimmt. Und das wiederum bedeutet, dass sich das Gehirn höchstwahrscheinlich auf die kollektive Aktivität verteilter Gruppen von Einzelneuronen stützt, um einen motorischen Befehl zu erzeugen.

Allerdings kam auch Widerspruch. Georgopoulos hatte jeweils nur ein Neuron nach dem anderen und nur in einem einzigen motorischen Hirnareal gemessen. Somit blieb die Grundhypothese unbewiesen, dass in der gleichzeitigen, aber unterschiedlichen Aktivität vieler Rindenneuronen, die sich auf mehrere Gebiete verteilen, eine Art Kodierungsschema für die geplante Bewegungsrichtung steckt. Zwar war damals längst bekannt, dass Stirn- und Scheitellappen des Gehirns beim Planen und Erzeugen motorischer Befehle zusammenwirken. Doch technische Unzulänglichkeiten hinderten die Neurophysiologen daran, ausgedehnte Bereiche des Gehirns gleichzeitig »anzuzapfen«. Darüber hinaus glaubten die meisten Fachleute, man müsse nur die Eigenschaften eines Neurons nach dem anderen katalogisieren, um zu einem vollständigen Funktionsschema des Gehirns zu gelangen – als ob die ▷

▷ Katalogisierung der Eigenschaften einzelner Bäume schon die ökologische Struktur eines ganzen Waldes offenbarte!

Zum Glück dachten nicht alle so. Als wir beide uns vor 15 Jahren an der heutigen Drexel-Universität in Philadelphia trafen, setzten wir uns mit dem vertrackten Problem auseinander, viele einzelne Nervenzellen gleichzeitig zu belauschen. Dank neuartiger, selbst entwickelter Techniken gelang es uns dann 1993, immerhin fast fünfzig Neuronen, die sich über fünf Hirnstrukturen verteilten, simultan bei einer Ratte abzuhören. Die Bereiche gehörten zum so genannten sensomotorischen System, das Sinnesinformationen empfängt und nutzt, um Bewegungen zu steuern.

Entscheidend für diesen Erfolg und alle weiteren waren neuartige Elektroden-Arrays: eine Anordnung feinster, mit Teflon ummantelter Drähte aus Edelstahl, die man in das Gehirn eines Tieres implantieren konnte. Die bisherigen Standard-Elektroden für einzelne Zellen ähnelten starren Nadeln. Sie arbeiteten gut, aber nur für ein paar Stunden, da sich um ihre Spitze Zellbestandteile ansammeln, die schließlich wie eine elektrisch isolierende Schicht wirken. Außerdem verletzten die steifen Elektroden Nervenzellen, wenn das Gehirn durch die normale körperliche Aktivität des Tieres leicht schwabbelte. Die in unserem Labor entwickelten Mikrodrähte hingegen besaßen stumpfere Spitzen, mit einem Durchmesser von circa 50 tausendstel Millimeter, und waren auch wesentlich flexibler. Ihr Vorteil: Keine Zellbestandteile versiegelten mehr die Elektrodenspitze, und die Nachgiebigkeit senkte das Verletzungsrisiko für die Nervenzellen. Dank dieser Eigenschaften konnten wir monatelang dieselben Zellen abhören.

Die nächste Herausforderung waren Systeme, welche die Hirnsignale in Befehle übersetzten, mit denen sich ein mechanischer Apparat steuern ließ. Gemeinsam mit Donald J. Woodward und Samuel A. Deadwyler von der Wake-Forest-Universität in Winston-Salem (North Carolina) sowie mit dem Elektroingenieur Harvey Wiggins, heute Direktor der Firma Plexon in Dallas, konstruierten wir aus kommerziellen elektronischen Bausteinen eine kleine Box, ähnlich jener neben Belles Kabine. Dieser nach Harvey benannte Kasten enthielt die erste Hardware, die Nervensignale aus vielen Elektroden exakt erfassen, filtern und verstärken konnte. Mit einer speziellen Software, welche die Charakteristika der elektrischen Entladungen individueller Zellen zu identifizieren vermochte, war es uns möglich, die Signale von bis zu vier aktiven Einzelneuronen im Umfeld einer Mikroelektrode zu unterscheiden.

Hirn als Handlanger

Bei unseren nächsten Experimenten Mitte der 1990er Jahre brachten wir einer Ratte bei, »durch Geisteskraft« einen Hebel im Käfig zu betätigen, um Wasser zu erhalten. Zunächst lernte sie, mit ihrer Vorderpfote den Hebel niederzudrücken, der elektronisch mit einem sichtbaren Hebelarm außerhalb des Käfigs verbunden war. Dieser Arm senkte sich auf einen Behälter, um daraus einen Tropfen Wasser zu spenden.

Wir statteten das Tier mit einer kleinen Version der Gehirn-Maschine-Schnittstelle aus, die später Belle erhielt. Jedes Mal, wenn das Gehirn der Vorderpfote »befahl«, den Hebel zu drücken, erfassten wir gleichzeitig die Signale von 46 abgehörten Nervenzellen. Über einstellbare Widerstände maßen wir jedem dieser Signale ein Gewicht bei. Dabei wählten wir die Einstellungen so, dass die Summe der gewichteten Inputsignale, über die Zeit integriert, ein einzelnes Outputsignal ergab, das sehr gut die Bewegungsbahn des Vorderbeins voraussagte. Dieser Integrator konnte über eine Steuereinheit den äußeren Hebelarm ebenfalls in Bewegung setzen.

Sobald die Ratte daran gewöhnt war, durch Drücken des Käfighebels Wasser zu erhalten, lösten wir die Verbindung zwischen ihm und dem äußeren Hebelarm. Wenn das Tier nun drückte, bewegte sich der Arm nicht. Frustriert wiederholte es immer wieder die Prozedur – vergebens. Aber mit einem Mal senkte sich der Hebelarm doch und spendete Wasser.

Was die Ratte nicht wusste: Ihre 46 Nervenzellen hatten in demselben Muster gefeuert wie bei früheren Versuchen, als der innere Hebel seine Funktion noch erfüllte. Dieses Muster veranlasste den Integrator, den äußeren Hebelarm in Bewegung zu setzen.

Nach mehreren Stunden begriff die Ratte, dass sie gar nicht mehr zu drücken brauchte. Hinschauen und sich vorzustellen, was die eigene Pfote sonst mit dem Hebel tat, reichte völlig. Ihre Hirnneuronen erzeugten dabei eben jenes Impuls-Muster, das unser Gehirn-Maschine-Interface als motorische Befehle für die Hebelarmbewegungen interpretierte. Nach einiger Zeit beherrschten vier von sechs Ratten diese Aufgabe. Sie hatten also gelernt, dass sie den motorischen Vorgang des Hebeldrückens gedanklich ausführen mussten.

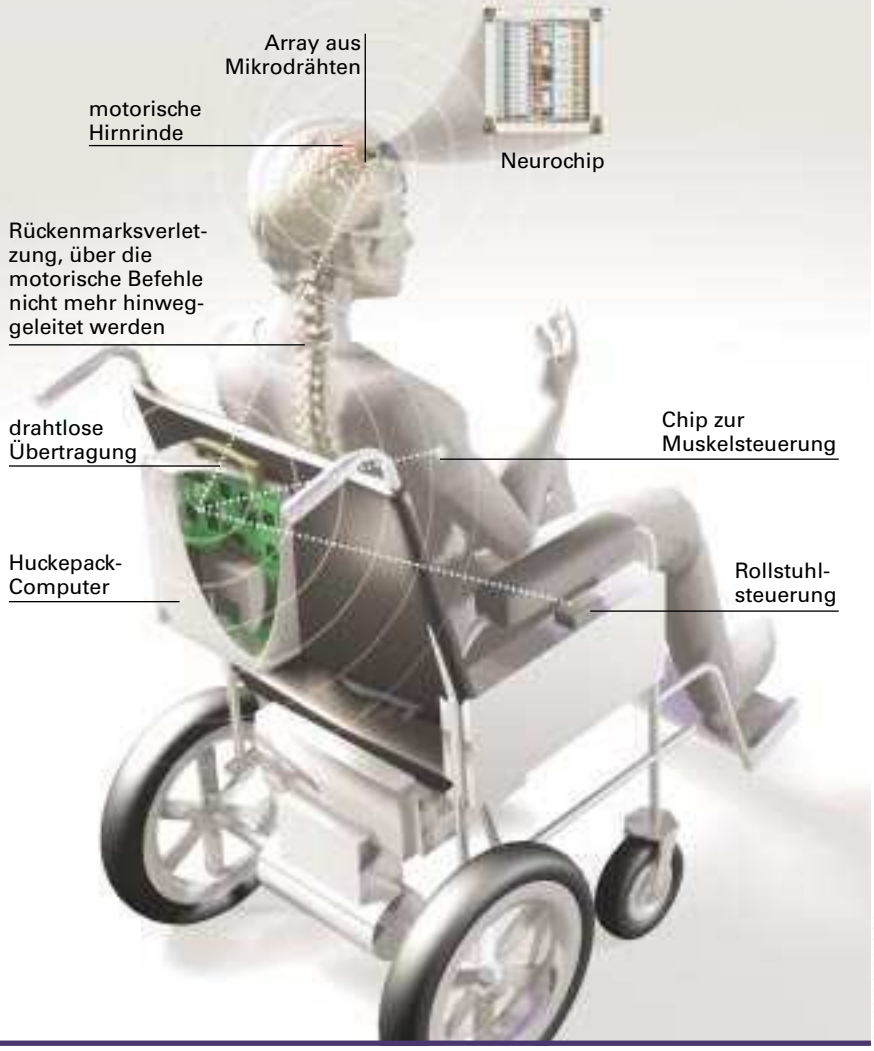
Hier ist nichts Mystisches im Spiel – und für einen Menschen ganz einfach nachzuvollziehen. Stellen Sie sich schlicht vor, den Arm auszustrecken und ein Glas Wasser zu ergreifen – ohne dass Sie es tatsächlich tun. Auf ähnliche Weise könnte eine Person beispielsweise mit einem amputierten Arm lernen, einen Roboterarm zu steuern, der mit ihrer Schulter verbunden ist.

Unser Erfolg bei Ratten ermutigte uns, zu Tieren überzugehen, deren Gehirn dem menschlichen Denkorgan schon viel ähnlicher ist: Wir wollten versuchen, die dreidi-

Visionäre Kraft

Eine Gehirn-Maschine-Schnittstelle könnte einmal Querschnittgelähmten zu mehr Eigenständigkeit verhelfen. Der Patient bekäme in mehrere Bereiche seiner motorischen Hirnrinde winzige Arrays drahtartiger Mikroelektroden implantiert, die mit einem Neurochip im Schädel verkabelt sind. Sobald sich diese Person einen bestimmten Bewegungsablauf ihres Armes vorstellt, zum Beispiel das Ausstrecken, um etwas Essbares von einem Tablett aufzunehmen, würde der Chip die begleitende elektrische Aktivität der Nervenzellen in eine Folge von Radio-Frequenz-Signalen umwandeln. Diese übermittelte er dann drahtlos an einen kleinen batteriebetriebenen »Huckepack«-Computer hinten am Rollstuhl.

Der Computer würde die Signale in motorische Befehle umsetzen und wiederum drahtlos an einen anderen Chip weiterleiten, der in den Arm des Patienten implantiert ist. Dieser zweite Chip soll die Nerven der benötigten Muskeln aktivieren und so den Arm in der gewünschten Weise bewegen. Alternativ könnte der Computer einen Roboterarm steuern, der am Rollstuhl montiert ist. Der Huckpack-Computer könnte zudem Motor und Lenkung des Rollstuhls steuern, sobald die Person sich vorstellt, wohin das Gefährt fahren soll. Im Falle einer Amputation könnte ein solches Huckepack-System auch eine Armprothese steuern. Patrick Wolf von der Duke-Universität in Durham hat bereits einen Prototypen eines Neurochips und eines Huckepack-Computers konstruiert.



BRYAN CHRISTIE DESIGN

mensionale Armbewegung eines Affen mit einem Roboterarm zu reproduzieren. Dazu mussten wir erst einmal ein Verfahren entwickeln, dass zuverlässig vorhersagte, wie die Tiere ihren eigenen Arm zu bewegen beabsichtigten.

Damals wechselte einer von uns (Nicolelis) zur Duke-Universität und richtete dort ein neurophysiologisches Labor ein. Gemeinsam bauten wir ein Interface, das fast hundert Nervenzellen, verteilt über Stirn- und Scheitellappen, gleichzeitig überwachen konnte. An Nachtaffen wollten wir es zuerst ausprobieren. Ihr Gehirn besitzt noch keine tiefen Furchen und Windungen, sodass die uns interessierenden Gebiete ihrer motorischen Hirnrinde an der Oberfläche zugänglich sind. Das erleichterte die Implantation unserer Mikrodrähte-Arrays. Sie funktionierten erfreulich gut und übermittelten uns über Monate die Nervenimpulse, die so genannten Aktionspotenziale, aus dem Gehirn.

Gedankenlesen

Bei unseren allerersten Experimenten hatten die Affen, darunter Belle, einen Joystick nach links oder rechts zu bewegen, sobald ein Licht auf der entsprechenden Seite eines Fernseh-Bildschirms aufleuchtete. Später setzten wir unsere Prüflinge in einen Stuhl gegenüber einer undurchsichtigen Blende, hinter der auf einem Tablett ein Stückchen Obst lag. Hob sich die Blende, musste das Tier seinen Arm ausstrecken, die Frucht ergreifen, sie zum Maul führen und seine Hand wieder nach unten in die Ausgangslage zurückziehen. Faseroptische Sensoren am Handgelenk erfassten kontinuierlich dessen Positionen und damit dessen Bewegungsbahn.

Bei den damaligen Analysen machte John Wessberg, heute an der Universität Göteborg in Schweden, eine erfreuliche Entdeckung: Die künftige Position der Affenhand ließ sich bereits einige wenige hundert Millisekunden vor der Aktion sehr gut vorhersagen – durch eine einfache Summation der elektrischen Aktivität der motorischen Rindenneuronen. Der wichtigste Trick bestand darin, im Computer beständig die neuronalen Aktivitäten zu kombinieren, die bis zu eine Sekunde vorher entstanden waren.

Im Verlauf unserer weiteren Forschungen erwarben wir von der Firma Plexon eine verbesserte Version der Harvey-Box. Damit und mit einigen selbst geschriebenen Echtzeit-Algorithmen greift unser Computer die Aktionspotenziale alle 50 ▷

▷ bis 100 Millisekunden ab und integriert die Daten. Spezielle Software übersetzte den Output in Befehle, nach denen ein Roboterarm dreidimensionale Bewegungen ausführen konnte. Nun erst startete der Versuch, ein solches Gerät tatsächlich über eine Gehirn-Maschine-Schnittstelle zu steuern. Als wir an jenem Nachmittag im Jahre 2000 sahen, wie unser mehrgelenkiger Roboterarm Belles Armbewegungen ausführte, konnte man über die Unglaublichkeit des Ganzen schon ins Grübeln geraten. Nur 50 bis 100 Nervenzellen, zufällig ausgewählt unter Abermillionen, vollbrachten die Arbeit, auf die es ankam.

Wie spätere mathematische Analysen ergaben, wuchs die Präzision der Roboterbewegungen in etwa mit der Anzahl erfasster Neuronen, wobei der Zuwachs im oberen Bereich geringer wurde. Bei der Auswertung von rund hundert Nervenzellen stimmte die Roboterhand in ihrer Bewegung zu rund 70 Prozent mit dem natürlichen Vorbild überein. Um eine eindimensionale Handbewegung – wie die zwischen rechts und links – auf 95 Prozent genau vorherzusagen, dürften nach weiteren Analysen schon 500 bis 700 Neuronen reichen, je nachdem, in welcher Hirnregion wir die Informationen abgreifen. Wie viele Neuronen werden wir dann brauchen, um den Verlauf dreidimensionaler, räumlicher Bewegungen – wie das Aufklauben eines Stückchens Obst – hochpräzise vorhersagen zu können? Vermutlich wiederum nur in der Größenordnung von Hunderten und nicht von Tausenden.

Zellen beim Lernen zuschauen

Wenn aus der Aktivität einer Gruppe zufällig ausgewählter Nervenzellen herauszulesen ist, welche Handbewegung ansteht, dann dürfte diese »Botschaft« innerhalb eines jeden motorischen Areals der Hirnrinde weit verteilt vorkommen. Diese Dezentralisierung ist für das Tier äußerst vorteilhaft: Im Falle einer Verletzung kann es auf ein riesiges Reservoir an Redundanz zurückgreifen. Für uns Forscher bedeutet dies, dass im Falle schwer gelähmter Patienten eine Neuroprothese möglicherweise mit einer kleineren Population von Nervenzellen zu betreiben ist als ursprünglich angenommen.

Nach Belles erfolgreicher Premiere setzten wir die Arbeit mit ihr und unseren anderen Affen fort. In dem Maße, wie die Tiere ihre Aufgabe besser beherrschten, veränderten sich die Eigenschaften ihrer Neuronen – nicht bloß im Laufe mehrerer Tage, sondern auch schon innerhalb der täglichen zweistündigen »Arbeitssitzung«. Der Beitrag einzelner Neuronen stieg oder fiel mit der Zeit. Dieses motorische Lernen galt es zu berücksichtigen. Daher erweiterten wir unser mathematisches Modell um eine Routine, die den Beitrag eines jeden Neurons periodisch überprüfte. Wenn Nervenzellen keinen signifikanten Einfluss mehr auf die Vorhersagen hatten, wurden sie von dem Modell ausgeschlossen und dafür andere einbezogen, die sich zu besseren Prädiktoren gemausert hatten.

Nun hatten wir also einen Weg gefunden, aus dem Gehirn einen neuronalen Output für die Bewegungsbahn der Hand zu extrahieren. Diese Kodierung, plus unsere Fähigkeit, die Aktivität von Nervenzellen zuverlässig über einen längeren Zeitraum zu messen, ermöglichte es unserer Gehirn-Maschine-Schnittstelle, Belles beabsichtigte Bewegungen mehrere Monate lang akkurat wiederzugeben. Wir hätten dieses Interface sogar noch länger nutzen können, aber wir besaßen die Daten, die wir brauchten.

Eine ganz wichtige Erkenntnis war, dass die so genannte Plastizität des Gehirns, die es lern- und anpassungsfähig macht, kein Hindernis für den Einsatz eines Gehirn-Maschine-Interface darstellt. Das Schöne an einem verteilten neuronalen Output ist ja gerade, dass er nicht auf eine bestimmte kleine Gruppe von Neuronen angewiesen ist. Wenn ein Interface monate- bis jahrelang Hunderte bis Tausende von Einzelneuronen verlässlich abhören und lernfähige mathematische Modelle einsetzen kann, so wird es auch mit Schwierigkeiten fertig werden, wie dem Absterben von Nervenzellen, neuronalen Entwicklungsvorgängen und sogar einem Nachlassen der Elektrodengüte.

Unser Interface hatte sich zwar für ein einfaches Primatengehirn im Prinzip bewährt. War es aber auch an komplexere

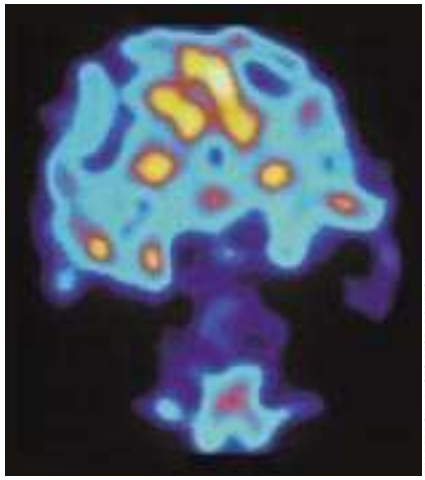
Epileptische Anfälle stoppen

Menschen mit schwerer chronischer Epilepsie erleiden Dutzende von Anfällen pro Tag. Ihre Lebensqualität ist stark gemindert. Außerdem können die vielen Anfälle das Gehirn schädigen. Zu allem Übel sprechen diese Patienten meist nicht mehr auf die herkömmlichen Medikamente an.

Ein Gehirn-Maschine-Interface kann bei Tieren Anfälle in Schach halten. Es funktioniert in gewisser Weise wie ein Defibrillator bei Herzkammerflimmern und überwacht beständig die elektrische Aktivität des Gehirns. Taucht ein Erregungsmuster auf, das einen Anfall ankündigt, wird das Gerät aktiv. Denkbar ist, dem Gehirn oder einem peripheren Nerv einen elektrischen Reiz zu versetzen, der das aufkeimende »Gewitter« unterdrückt. Alternativ könnte ein Signal des Interface ein Medikament aus einem Speicher freisetzen.

Die Machbarkeit dieses Konzeptes bewiesen wir zusammen mit Erika E. Fanselow und Ashian P. Reid, die inzwischen an der Brown-Universität in Providence (Rhode Island) beziehungsweise an der Universität von Pennsylvania in Philadelphia tätig sind. Wir implantierten ein Gehirn-Maschine-Interface mit seinen Mikroelektroden-Arrays bei Ratten, die Pentylentetrazol erhielten. Die Substanz induziert wiederholt epileptische Anfälle.

Wenn sich ein Anfall anbahnt, beginnen Nervenzellen der Hirnrinde in hochsynchronisierten Salven zu »feuern«. Sobald das Gerät dieses Muster entdeckte, löste es eine elektrische Reizung des fünften Hirnnervs aus. Der kurze Reiz unterbrach rasch und wirkungsvoll die epileptische Aktivität, ohne den Nerv zu schädigen. Dadurch verminderte sich die Häufigkeit und Dauer der Anfälle.



TIM BEDDOW / PHOTO RESEARCHERS, INC.

Hirnregionen mit übermäßiger Erregung sind auf diesem Positronen-Emissionstomogramm (PET) gelb hervorgehoben, das während eines epileptischen Anfalls erstellt wurde.

Gehirne anzupassen? Im Mai 2001 begannen wir es an drei Rhesusaffen zu erproben. Ihr Gehirn ist ähnlich wie beim Menschen gefurcht. Wir benutzten dasselbe Interface wie für Belle, mit einer einzigen entscheidenden Erweiterung: Von nun an konnten die Affen selbst sehen, wie gut oder schlecht das System ihre Handbewegungen nachahmte. Ihre Aufgabe ähnelte diesmal einem Computerspiel: Sie durften mit einem Joystick einen Cursor beliebig über einen Computer-Bildschirm jagen. Sobald aber irgendwo auf dem Monitor eine »Zielscheibe« auftauchte, musste der Cursor blitzschnell – innerhalb einer halben Sekunde – darin platziert werden. Für jeden Treffer gab es einen Schluck Fruchtsaft zur Belohnung.

Der erste Rhesusaffe, der diese Aufgabe meisterte, war Aurora, ein elegantes Weibchen, das zweifellos den Erfolg genoss, eine Trefferquote von mehr als 90 Prozent zu erzielen. Ein Jahr lang registrierten unsere beiden wissenschaftlichen Mitarbeiter Roy Christ und José Carmena dabei die Aktivität von bis zu 92 Nervenzellen in fünf Bereichen der Stirn- und Scheitelrinde von Auroras Gehirn. Als die Affendame das Spiel beherrschte, versuchten wir sie auszutricksen. In etwa 30 Prozent der Fälle unterbrachen wir die Verbindung zwischen Joystick und Cursor. Aurora sollte dann allein kraft ihrer neuronalen Aktivität, die ständig von unserem Gehirn-Maschine-Interface verarbeitet wurde, den Cursor rasch ins Ziel bewegen.

Nach anfänglicher Irritation änderte Aurora ihre Strategie allmählich. Zwar führte sie weiterhin Handbewegungen aus, hatte aber nach einigen Tagen begriffen, dass sie den Cursor auch immer allein mit ihrem Gehirn steuern konnte, wenn sie wollte. Bei einigen der täglichen Tests in den folgenden Wochen machte Aurora nämlich keinerlei Anstalten mehr, die Hand zu bewegen: Sie führte den Cursor ausschließlich dadurch, indem sie sich die Bewegungsbahn vorstellte.

Das war noch nicht alles. Die Vorhersagen durch das Gehirn-Maschine-Interface wurden immer genauer, obwohl es stets von denselben Nervenzellen Informationen abgriff. Auch wenn noch eingehendere Analysen notwendig sind, um diesen Befund zu verstehen, gibt es zumindest eine Erklärung: Die visuelle Rückkopplung half Aurora, die Reaktion der Gehirn-Maschine-Schnittstelle auf die Lerneffekte von Gehirn wie Maschine zu steigern. Wenn sich dies als richtig erweist, könnte ein Feedback über die Augen oder andere Sinne auch Menschen in die Lage versetzen, die Leistung ihres Gehirn-Maschine-Interface zu steigern.

Ermutigend ist zugleich eine andere Beobachtung. Als wir diesen Artikel verfassten, lag die Implantation der Elektroden bei Aurora schon ein Jahr zurück, aber immer noch registrierten sie täglich die Aktivität von immerhin sechzig bis siebzig Nervenzellen. Selbst bei einem Primaten mit einem gefurchten Gehirn können also unsere Mikrodrähte-Arrays über eine lange Zeit qualitativ hochwertige Mehrkanal-Signale liefern. Obwohl es nicht mehr die 92 Neuronen wie anfangs sind, bleibt Auroras Leistung mit dem Gehirn-Maschine-Interface auf dem höchsten von ihr erreichten Niveau.

Ein Abbild der Prothese im Gehirn?

Wir wollen nun die Aufgaben für Aurora weiter erschweren. Wir haben das Interface modifiziert, um ihr für neue, jetzt anlaufende Experimente eine taktile Rückkopplung zu ermöglichen. Diesmal steuert es einen in der Nähe befindlichen Roboterarm, ausgestattet mit einem Greifer, der eine Hand simuliert. Kraftmesser sollen anzeigen, wann der Greifer ein Objekt berührt, und wie viel Kraft erforderlich ist, um es festzuhalten. Die taktile Rückkopplung – ist das Objekt schwer oder leicht, glitschig oder griffig? – geschieht über eine Art Pflaster auf Auroras Haut, in das Vibratoren eingebettet sind. Veränderungen in den Vibrationsfrequenzen sollten es Aurora herauszufinden erlauben, wie stark der Roboterarm zupacken darf und muss, um zum Beispiel eine Stückchen Obst aufzuheben und es festzuhalten, wenn er es ihr herüberreicht. Dieses Experiment dürfte uns den konkretesten aller bisherigen Belege liefern, dass eine schwer gelähmte Person Grundbewegungen eines Arms wieder ausführen könnte: durch ein Hirnimplantat, das über Drähte, oder auch drahtlos, mit Signalgeneratoren in einem Arm kommuniziert.

Angenommen, bei Aurora imitieren die visuellen und künstlichen taktilen Rückmeldungen hinreichend die Informationen, die normalerweise vom eigenen Arm zum Gehirn zurückfließen. Dann könnte ein dauerhafter Dialog mit einem Gehirn-Maschine-Interface möglicherweise ihr Gehirn veranlassen, den Roboterarm gewissermaßen als weiteren Teil ihres Körpers zu verinnerlichen. Körperrepräsentationen existieren bekanntermaßen in den meisten Hirnregionen. Sie sind aber nicht starr festgelegt. Wird ein Affe beispielsweise trainiert, für eine bestimmte motorische Aufgabe immer wieder nur den Zeigefinger der rechten Hand zu benutzen, dann wird sich das »Abbild« dieses Fingers auf seiner motorischen Rinde vergrößern. Daher ist sogar denkbar, dass Nervengewebe in Auroras Gehirn sich ausschließlich darauf verlegt, die Aktionen des Roboterarms zu steuern und seine Feedbacks zu interpretieren.

Um diese Hypothese zu prüfen, wollen wir dieselben Cursor-Experimente nochmals mit Affen durchführen, nur dass ein Arm diesmal vorübergehend betäubt und somit die natürliche Rückinformation ausgeschaltet wird. Wir vermuten, dass nach einer Übergangsphase das Tier mit dem Interface ebenfalls gut zurechtkommt. Wenn sein Gehirn den Roboterarm wirklich in sein Körperschema integriert, darf man berechtigterweise erwarten, dass das Gehirn ▷

▷ eines Querschnittgelähmten das Gleiche tun wird. Nervenzellen, die einst einer natürlichen Gliedmaße dienten, würden für eine andere Aufgabe abgestellt: die Handhabung einer künstlichen Gliedmaße.

Jeder unserer Fortschritte zeigte, wie plastisch das Gehirn ist. Dennoch wird es immer Grenzen geben. Wer zum Beispiel einen Schlaganfall erlitten hat, wird kaum die volle Kontrolle über ein Roboterglied erlangen. Der Schaden im Gehirn ist gewöhnlich zu ausgedehnt und zu tiefgreifend – er beeinträchtigt nicht nur die Hirnrinde, sondern auch das darunter liegende Kabelnetz, das die Kommunikation zwischen Hirngebieten ermöglicht. Deshalb gewinnen Schlaganfall-Patienten auch nur selten wieder die volle Kontrolle über die betroffenen Gliedmaßen, selbst wenn sie eisern üben.

Trotz viel versprechender Ergebnisse im Tierexperiment müssen wir Forscher uns sehr davor hüten, falsche Hoffnungen bei Menschen mit schweren Behinderungen zu wecken. Zahlreiche Hindernisse sind noch zu überwinden, bevor Gehirn-Maschine-Interfaces als sichere, zuverlässige und effektive therapeutische Optionen gelten dürfen. Wir müssen in klinischen Studien nachweisen, dass eine gegebene Gehirn-Maschine-Schnittstelle die Lebensqualität wesentlich verbessert, ohne das Risiko zusätzlicher neurologischer Schäden zu erhöhen.

Hundertschaften rekrutieren

Das operative Einpflanzen von Elektroden-Arrays zum Beispiel wird immer auch medizinische Bedenken aufwerfen. Wir müssen erst herausfinden, ob besonders dicht gepackte Mikrodrähte-Arrays, die derzeit entwickelt werden, langfristig funktionieren, ohne beim Menschen Gewebe zu schädigen oder Infektionen zu verursachen. Mit einer neuen Methode von Gary Lehew, Elektrotechniker an der Duke-Universität, lässt sich die Anzahl der drahtartigen Mikroelektroden auf einem leichten und einfach implantierbaren Plättchen bereits deutlich erhöhen. So können wir inzwischen mehrere Plättchen einpflanzen, von denen jedes bis zu 160 Mikroelektroden umfasst und nur fünf mal acht Millimeter misst. Es ist somit kleiner als der Nagel eines kleinen Fingers. Kürzlich haben wir einem Rhesusaffen insgesamt 704 Mikroelektroden implantiert und die Aktivität von 318 Neuronen gleichzeitig erfasst. Die Arrays verteilten sich dabei auf acht Bereiche der Hirnrinde.

Darüber hinaus müssen die Elektronik und die Batterien stark verkleinert werden. Mit Jose Carlos Principe von der Universität von Florida in Gainesville arbeiten wir derzeit an einer implantierbaren Mikroelektronik, die in ihrer Hardware die neuronale Mustererkennung vereint, die wir vorerst noch per Software bewerkstelligen. Die direkte Fessel an einen Computer entfällt. Ein solcher Mikrochip muss dann drahtlos Steuerungsdaten an die Aktuatoren des Roboters übermitteln.

Drahtlose Neurochips

Zusammen mit dem Team von Patrick D. Wolf an der Duke-Universität haben wir den ersten drahtlosen »Neurochip« gebaut und im ersten praktischen Einsatz an Aurora getestet. Zu beobachten, wie auf einem Laptop viele Meter von der Affendame entfernt Ströme neuronaler Aktivität aufflackern, war für uns höchst befriedigend; denn es handelte sich um den ersten drahtlosen Kontakt zwischen einem Primatengehirn und einem Computer.

Mehr und mehr Wissenschaftler begeistern sich für die Vision, mit Gehirn-Maschine-Interfaces Patienten zu helfen, und haben inzwischen ähnliche Ergebnisse bei Tieren erzielt. Dieses neue Feld macht also gute Fortschritte. Den besten klinischen Nutzen versprechen wir uns von Gehirn-Maschine-Interfaces für hunderte oder ein paar tausend Einzelneuronen, die sich über mehrere motorische Regionen der Stirn- und Scheitellappen verteilen. Viel weniger – kaum dreißig Neuronen in nur einem einzigen Rindengebiet etwa – könnte niemals von klinischem Nutzen sein, denn solchen Schnittstellen würde die Reservekapazität fehlen, um Zellverluste oder Veränderungen in der neuronalen Ansprechbarkeit aufzufangen. Das andere Extrem – nämlich Millionen von Nervenzellen mit Hilfe großflächiger Elektroden zu erfassen – würde höchstwahrscheinlich ebenso wenig funktionieren. Der Eingriff ins Gehirn wäre wohl zu stark.

Zwar gibt es auch Verfahren, die ganz ohne Eingriff auskommen, doch eignen sie sich vermutlich nur begrenzt zum gedanklichen Steuern von Prothesen. Ein Beispiel ist die Elektroenzephalografie, kurz EEG. Mit ihr lassen sich die Hirnströme von der Kopfhaut abgreifen und für eine andere Art von Gehirn-Maschine-Interface nutzen. Niels Birbaumer von der Universität Tübingen hat erfolgreich EEG-Ableitungen und ein Computer-Interface bei Patienten eingesetzt, die durch schwere neurologische Erkrankungen völlig gelähmt waren. Sie lernten, ihre EEG-Aktivität so zu verändern, dass sie damit einzelne Buchstaben auf einem Computer-Bildschirm auswählen und zu einer Botschaft zusammensetzen konnten. Die Prozedur ist zeitaufwendig, bietet aber die einzige Möglichkeit für diese Menschen, mit der Welt zu kommunizieren. EEG-Signale lassen sich jedoch nicht direkt für Bein- oder Armprothesen nutzen, da sie die durchschnittliche elektrische Aktivität großer Populationen von Neuronen abgreifen; es ist schwierig, daraus die feinen Variationen zu extrahieren, die für eine Kodierung exakter Arm- und Handbewegungen erforderlich sind.

Trotz aller verbleibenden Hindernisse haben wir reichlich Anlass zu Optimismus – auch wenn sich unsere Vision, die wir an jenem denkwürdigen Nachmittag mit Belle so lebhaft vor Augen hatten, vielleicht erst in einem Jahrzehnt verwirklicht: Zeuge zu sein, wie erstmals ein Mensch mit einer Neuroprothese umgeht, sie kraft seiner Gedanken betätigt. ◁

Miguel A. L. Nicolelis, Professor für Neurobiologie, biomedizinische Technik, Psychologie und Hirnforschung an der Duke-Universität in Durham,

ist einer der Leiter des dortigen Zentrums für Neurotechnik. Der gebürtige Brasilianer promovierte an der Universität von Sao Paulo in Neurophysiologie und arbeitet seit mehr als zehn Jahren mit seinem Koautor zusammen. **John K. Chapin** ist derzeit Professor für Physiologie und Pharmakologie am Downstate Medical Center der Staatlichen Universität von New York. Promoviert hat er in Neurophysiologie an der Universität Rochester.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Literaturhinweise

Kommunikation in der Kommunikationslosigkeit: Ein Gedankenübersetzungssystem für vollständig Gelähmte. Von N. Birbaumer und N. Neumann in: Wohin geht die Wissensgesellschaft? Bd. 9, S. 206, Kleine Verlag, Bielefeld 2002.

Neural Protheses for Restoration of Sensory and Motor Function. Hg. von J. K. Chapin und K. A. Moxon, CRC Press, 2001.

Real-Time Prediction of Hand Trajectory by Ensembles of Cortical Neurons in Primates. Von J. Wessberg et al. in: Nature, Bd. 408, S. 361, 2000.

Real-Time Control of Robot Arm Using Simultaneously Recorded Neurons in the Motor Cortex. Von J. K. Chapin et al. in: Nature Neurosciences, Bd. 2, S. 664, 1999.

Links zu diesem Thema bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«

DOMARCHIV MAILAND

Ein Muslim im Kirchenfenster

Der Arzt und Philosoph Avicenna kam wie kein anderer Gelehrter aus dem arabisch-islamischen Raum auch im Abendland zu hohen Ehren. In einer rast- und ruhelosen Epoche verfasste er Werke, die jahrhundertelang an europäischen Hochschulen als Standardlehrbücher benutzt wurden.

Von Gotthard Strohmaier

Über einem Altar im nördlichen Querschiff des Mailänder Doms befindet sich ein buntes Glasfenster von besonderer wissenschaftshistorischer Bedeutung. Es zeugt von der Rezeption arabischer Wissenschaft in unserem europäischen Mittelalter. Gestiftet hatte es im Jahr 1479 die örtliche Apothekerzunft.

Dargestellt sind legendenhafte Szenen aus dem Leben des Johannes von Damaskus (um 650–750). Dieser Sohn eines arabischen Christen arbeitete zunächst in der Finanzverwaltung der Omaijadenkalifen. Nach einem Herrscherwechsel zog er sich als Mönch in ein Kloster bei Jerusalem zurück, wo er sich unter anderem durch eine spöttische Polemik gegen den noch jungen Islam und seinen Stifter Mohammed hervortat. Er schrieb in seiner Muttersprache Griechisch, was die Muslime nicht lesen konnten. Die eigenständige christliche Kultur in der Region mit ihren Klöstern und der Kenntnis des Griechischen ermöglichte auch das Weiterleben der antiken Wissenschaften. Erst ab dem 9. Jahrhundert begannen arabische, persische und syrische Gelehrte, die Werke der Griechen ins Arabische zu übersetzen, sodass sie auch den Muslimen zugänglich wurden.

Kleinere Medaillons des Mailänder Kirchenfensters sind mit Fantasieporträts von berühmten Ärzten gefüllt. Drei von ihnen lebten im klassischen Altertum: Hippokrates, der »Vater der Medizin«, Galen von Pergamon, der im zweiten nachchristlichen Jahrhundert in Rom wirkte, und Dioskurides, der Verfasser eines oft illustrierten Heilpflanzenbuches. Zwei weitere sind orientalische Christen; aber links daneben erscheint ein dritter, der wegen des beigeschriebenen Namens als Muslim zu erkennen ist. Wieso wurde ihm die Ehre zuteil, im Fenster einer christlichen Kirche abgebildet zu werden?

Der Porträtierte ist der gebürtige Perser Avicenna (um 980–1037). Unter diesem Namen kannte man ihn im lateinischen Westen. Seine Wertschätzung gründete sich auf die Arzneikunde in seinem berühmten »Kanon der Medizin«, der an medizinischen Fakultäten in Europa jahrhundertelang als Lehrbuch eingesetzt wurde. Der fünfte Teil des Werkes, der die aus einfachen Substanzen zusammengesetzten Heilmittel behandelt, ist übrigens nichts weiter als ein Auszug aus den einschlägigen, in griechischer Sprache verfassten Schriften Galens; aber die waren im lateinischen Westen noch kaum zugänglich, und so wirkte Avicenna als Vermittler.

In seiner persischen Heimat wussten noch Generationen nach ihm Wunderdinge von seiner medizinischen Praxis zu erzählen. Da war etwa der Fall eines Prinzen, der auf unerklärliche Weise abmagerte. Avicenna fühlte ihm den Puls, während andere die Namen der Straßen der Stadt nacheinander aufsagen mussten. Bei der Nennung einer bestimmten Straße wurde der Puls des jungen Mannes unregelmäßig. Nun ging es an die einzelnen Häuser dieser Straße und danach an die Bewohner eines bestimmten Hauses, bei dessen Nennung der Puls wieder heftig reagiert hatte. Auf diese Weise kreiste der Meister schließlich ein Mädchen ein, in das der Unglückliche verliebt war. Nicht minder erfolgreich wie die Diagnose war die Therapie: Im Einvernehmen mit dem regierenden Herrscher arrangierte Avicenna die Hochzeit.

Der Kern dieser Geschichte entspricht einer Wanderanekdote, die ähnlich auch schon von Ärzten des Altertums erzählt wurde. Aber darum ist sie nicht unglaubwürdig. Denn warum sollte Avicenna, der die übersetzte Literatur bestens kannte, die Methode nicht selbst angewendet haben? Er behauptet es jedenfalls in seinem »Kanon«. ▷

Das Glasfenster vom heiligen Johannes dem Damaszener im Dom von Mailand enthält ein Fantasieporträt des muslimischen Arztes Avicenna (Ausschnittvergrößerung links oben).

DOMARCHIV MAILAND

MS. GREC. 2179, FOL. 134 R; BIBLIOTHÈQUE NATIONALE DE FRANCE

Die ältesten bekannten Abbildungen von Heilpflanzen befinden sich in der Schrift »De materia medica« des Dioskurides – hier die Darstellung der Schwalbenwurz in einer Abschrift des Werkes aus dem 9. Jahrhundert.

Gänzlich unwahrscheinlich ist hingegen eine Begebenheit, die man noch heute in Avicennas Heimatstadt Buchara hören kann. Der Meister habe so viele Patienten gehabt, dass er unmöglich alle zu Hause besuchen konnte. Der Ausweg: Man spannte Fäden vom Handgelenk der Kranken quer durch die Stadt zu ihm, durch die hindurch er ihren Puls zu fühlen vermochte. Eine Greisin, der es offenbar schon wieder recht wohl ging, machte sich einen Scherz, indem sie den Faden um die Pfote ihrer Katze spannte. Als Avicenna den Faden am anderen Ende in die Finger nahm, soll er ungläubig den Kopf geschüttelt und gemurmelt haben: »Das ist doch nicht möglich, die alte Frau bekommt Sechslinge.«

Der wirkliche Avicenna, wie er uns aus seinen Werken entgegentritt, hat sich indes nicht als hauptamtlicher Arzt gefühlt. Er war ein Philosoph von durchaus eigenständiger Prägung, der das Wissen seiner islamischen Kultur souverän beherrschte. Dazu gehörten neben der Philosophie die Mathematik und Geometrie, die Astronomie, die Geodäsie, die Mechanik, die Tier- und Pflanzenkunde und schließlich auch die Medizin, die nach seinen Worten »keine schwere Wissenschaft« war.

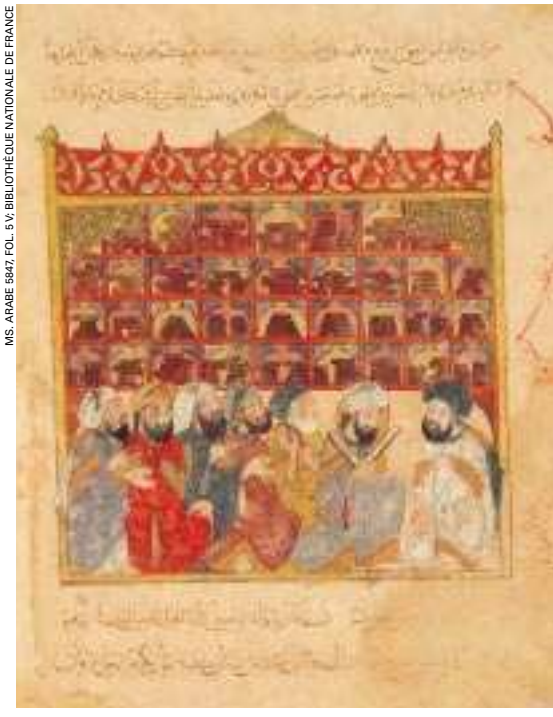
Avicenna, der mit seinem vollen arabischen Namen Abu Ali al-Husain ibn Abdallah ibn al-Hasan ibn Ali ibn Sina hieß, wurde um das Jahr 980 christlicher Zeitrechnung in der Nähe von Buchara als Sohn eines hohen Staatsbeamten geboren. In seiner Autobiografie beschreibt er anschaulich, wie er sich als frühreifes Wunderkind und mit unersättlicher Wissbegier ausgerüstet teils bei Lehrern, teils autodidaktisch die Wissenschaften aneignete. »Wenn ich in einer Frage in Verlegenheit war …, pflegte ich deswegen die Moschee aufzusuchen und zum Schöpfer des Alls zu beten und zu flehen, dass er mir das Verschlossene auftun und das Schwere leicht machen möge. In der Nacht kehrte ich in meine Behausung zurück, stellte die Lampe vor mich hin und widmete mich dem Lesen und Schreiben. Wenn mich der Schlaf übermannen wollte oder ich eine Schwäche verspürte, wandte ich mich einem Becher Wein zu, um wieder zu Kräften zu kommen. Dann kehrte ich zu meiner Lektüre zurück. Und wenn immer mich ein Schlummer überwältigte, sah ich ebendiese Probleme im Traum. Viele Fragen sind mir im Schlaf klar geworden. Ich fuhr auf diese Weise fort, bis bei mir alle Wissenschaften fest eingeprägt waren und ich sie so begriffen hatte, wie es einem Menschen möglich ist. Alles, was ich in dieser Zeit gelernt habe, ist so, wie ich es jetzt weiß, bis heute ist nichts dazugekommen.«

Der Ruhm seiner Gelehrsamkeit verbreitete sich auch über die Grenzen seiner Heimatstadt hinaus. Und so erreichte ihn eines Tages ein Schreiben aus Kath, der weiter nördlich am Amudarja gelegenen Hauptstadt des damaligen Reiches Choresm. Der Brief stammte von dem etwas älteren und ebenso lernbegierigen Gelehrten al-Biruni und enthielt 18 Fragen zu einigen naturwissenschaftlichen Problemen, die diesem bei der Lektüre des Aristoteles aufgestoßen waren. Die Korrespondenz mit den Antworten Avicennas und den dagegen geäußerten Einwänden al-Birunis ist erhalten. Aristoteles hatte, um ein Beispiel herauszugreifen, vier Elemente angenommen, aus denen unsere irdische Welt bestehen sollte, nämlich Erde, Wasser, Luft und Feuer. Was geschieht nun, fragte al-Biruni, wenn Wasser verdampft? Verwandelt es sich in richtige Luft, oder verteilen sich seine Teilchen nur in der Luft? Avicenna berief sich in seiner Antwort sogar auf ein Experiment. Er hatte eine Glasflasche mit Wasser gefüllt, fest verstöpselt und in einen Kohleofen gelegt. Die Explosion ließ nicht lange auf sich warten, und Avicenna glaubte zu beobachten, wie die wirkliche Verwandlung des Wassers gleich bis zu der Form des Feuers weiterging.

Die Methodik des Experiments war eben noch nicht entwickelt, und wo doch einmal Versuche gewagt wurden, waren sie der Fehldeutung stärker ausgesetzt als die spontanen Beobachtungen in der Natur.

Die Erde in der Mitte der Sphären

Die Phänomene des gestirnten Himmels waren zur damaligen Zeit von weltanschaulicher Brisanz. Die Fixsterne, die ihre Abstände zueinander nicht ändern und einen absolut gleichmäßigen täglichen Umschwung am Firmament vollführen, schienen an einer Kugelschale festgemacht zu sein. Verbildlicht wurde das durch Himmelsgloben, wie sie die Araber in griechischer Tradition herstellten. Auf diesen Modellen sind die Sternbilder von ihrer Rückseite dargestellt, so als würde man sie von »außen« betrachten. Es gab nur einzelne Querdenker – zu denen später auch al-Biruni gehörte –, die wenigstens mit der Möglichkeit rechneten, dass der Umschwung der Fixsterne nur auf einer Täuschung beruht und statt dessen die relativ kleine Erdkugel an ihrem Ort inmitten der ausgedehnten Himmelssphären rotiert.



MS. ARABE 5847, FOL. 5 V; BIBLIOTHÈQUE NATIONALE DE FRANCE

Diese Miniatur aus einer irakischen Handschrift des al-Hariri (1054–1122) zeigt die Bibliothek von Heluan mit diskutierenden Gelehrten.

BILDARCHIV PREUSSISCHER KULTURBESITZ BERLIN; MUSEUM FÜR ISLAMISCHE KUNST

Der Aderlass – hier dargestellt auf einer Fayenceschale aus Rayy aus dem 13. Jahrhundert – war seit Galen ein Allheilmittel, mit dem »schlechte Säfte« abgezogen wurden.

Avicenna hat später in einer Spezialschrift belegt, warum die Erde in der Mitte des Kosmos stillstehen müsse. Sie musste es im Rahmen seines Systems, das er im engen Anschluss an den türkischen Philosophen al-Farabi (um 870–950) entwickelte. Avicenna wurde auf diesen Gelehrten zufällig aufmerksam, wie er in seiner Autobiografie berichtet. Obwohl er die »Metaphysik« des Aristoteles vierzigmal durchgelesen hatte und schon auswendig wusste, verstand er den Inhalt nicht. Aber auf dem Buchmarkt von Buchara drängte ihm ein Händler eine Schrift al-Farabis auf: »Über die Intentionen des Buches der Metaphysik«. Weiter berichtet Avicenna: »Ich kehrte nach Hause zurück und ging eilends an die Lektüre. Da ging mir mit einem Male der Sinn dieses Buches auf, denn ich kannte es ja bereits auswendig. Ich freute mich darüber und gab am folgenden Tag ein reichliches Almosen für die Armen aus Dankbarkeit gegen Gott, der erhaben ist.«

Aristoteles hatte die gleichmäßige Bewegung der Himmelskörper als ein liebend-beseeltes, aber ewig unerfülltes Hinstreben zu einer obersten unsichtbaren Gottheit gedeutet. Spätere griechische Denker, von denen al-Farabi beeindruckt war, hatten die Welt in einem ständig andauernden Prozess aus einem übersinnlichen und jenseits allen Begreifens liegenden Wesen hervorgehen lassen, das sie schlicht »das Eine« nannten. Dies vollzog sich in Stufen, deren allerunterste die Materie war, die Wurzel des Bösen in der Welt, in die der Mensch verstrickt ist, aus der er sich aber durch das Denken der philosophischen Wahrheiten herausheben kann, bis er nach dem Tod geläutert in die obere göttliche Lichtwelt aufsteigt.

Dieses »Eine« der griechischen Philosophie konnte man mit einiger Mühe mit dem Gott des Korans zusammendenken, der die Welt zu einem bestimmten Zeitpunkt geschaffen hat und ihr auch einmal ein Ende setzen wird. Die muslimischen Philosophen, unter ihnen Avicenna, erklärten solche Aussagen des heiligen Buches als pädagogische Anpassung an den Verstand des einfachen und zum abstrakten Denken unfähigen Volkes. Vermittelt werden sollte der Grundgedanke, dass die Welt nicht aus sich selbst bestehe, sondern von einem göttlichen Ursprung abhängig sei. Der ewige Prozess des Hervorgehens oder »Ausfließens«, wie man es in der griechischen wie in der arabischen Philosophie formulierte, vollzog sich laut al-Farabi in Stufen durch die Sphären der Fixsterne und der Planeten hindurch. Sie boten mit ihren unveränderlichen Bewegungen einen anschaulichen Übergang hinunter in den Wirrwarr unseres irdischen Daseins.

Am Herrscherhof in Buchara

Al-Biruni warf einen revolutionären Gedanken in die Debatte: Könnten nicht die Himmelskörper auch aus irdischer Materie bestehen und mechanischen Gesetzen unterliegen? Schließlich schienen Gebirge ebenfalls unveränderlich zu sein, obwohl man wisse, dass dem nicht so sei. Hierauf antwortete Avicenna sehr gereizt, denn al-Biruni hatte sich angeschickt, einen Baustein seines philosophischen Weltgebäudes herauszubrechen. Im Wesentlichen verlief jedoch die Diskussion der beiden jungen Männer in einer respektvollen Tonart.

Auch in der Stadt Buchara verbreitete sich Avicennas Ruf. So kam es, dass er noch in jungen Jahren in das Ärztekollegium aufgenommen wurde, das den schwerkranken Emir Nuh ibn Mansur behandeln sollte. Avicenna nutzte die Gelegenheit, die ihm die Nähe des Herrschers bot. Er erzählt in seiner Autobiografie: »Eines Tages bat ich ihn um die Erlaubnis, die Bibliothek zu betreten und die Bücher einsehen und den Inhalt lesen zu dürfen. Er gewährte es mir, und man führte mich in ein Gebäude mit vielen Räumen. In jedem Raum waren Kästen mit übereinander geschichteten Büchern. In einem der Räume waren die Bücher über die arabische Sprache und die Poesie, in einem anderen die Rechtswissenschaft, und so weiter in jedem Raum eine besondere Disziplin. Ich las den Katalog mit den ›Büchern der Alten‹ und verlangte, was ich brauchte. Da sah ich Bücher, wie sie vielen Leuten nicht einmal dem Titel nach bekannt waren und die ich zuvor nie gesehen hatte und auch danach nicht zu Gesicht bekam.«

Mit den »Alten« sind keine anderen als die alten Griechen gemeint. Ihre Werke hatten kompetente christliche Übersetzer im 9. Jahrhundert in Bagdad ins Arabische übertragen. Die Texte, obwohl keineswegs immer mit dem orthodoxen Islam konform, verbreiteten sich in den interessierten Kreisen. Auf diese Weise füllten sie auch eine Abteilung der fürstlichen Bibliothek im fernen Buchara. Von dem respektablen Geistesleben des geografisch näher liegenden ▷

STADTBIBLIOTHEK TRIER

Das Titelblatt einer lateinischen Ausgabe des »Kanon der Medizin« zeigt Avicenna als gekrönten Fürsten der Ärzte zwischen Galen und Hippokrates.

China wussten die Muslime nichts. Nur das Papier hatten sie von dort übernehmen können, nachdem Kriegsgefangene das Geheimnis der Herstellung verraten hatten. Das billige Schreibmaterial wurde zu einem bedeutenden Kulturfaktor. Von den Indern war hingegen etwas von ihrer Medizin, ihrer Astronomie und ihrer Mathematik in Übersetzung zugänglich geworden. Im Händlermilieu verbreitete sich ihre praktische Stellenschreibweise der Ziffern mit der Null, die wir nicht ganz zutreffend die »arabischen« nennen. Avicennas fürsorglicher Vater hatte ihn, damit er auch das noch lerne, zu einem Gemüsehändler auf den Markt geschickt.

Eine oft erzählte Legende will wissen, dass Avicenna die Erlaubnis zum Besuch der Hofbibliothek erhalten habe, weil er den Emir erfolgreich heilte, nachdem die Kunst der anderen Ärzte erfolglos geblieben war. Doch Avicenna, der sonst sein Licht durchaus nicht unter den Scheffel zu stellen pflegte, berichtet davon nichts, und der Emir ist auch bald darauf gestorben. Aber er hat dem Herrscher als junger Philosoph einen anderen Dienst erwiesen, indem er ihm nämlich eine Schrift widmete. Dieses Werk ist uns erhalten. Darin schlägt Avicenna unter anderem ein Thema an, das ihn zeit seines Lebens beschäftigen sollte: nämlich der schwierige Nachweis, dass die Seele als eine vom Körper unabhängige und unsterbliche Substanz zu begreifen sei, die vom Untergang des Körpers nicht mitbetroffen wäre. Avicenna trägt zu diesem Zweck verschiedene Argumente vor. Zum Beispiel solle die körperliche Kraft ab dem vierzigsten Lebensjahr dem Verfall unterliegen, nicht aber die geistige, was auf deren Unabhängigkeit hindeute. Auch umfassten die Begriffe der Geometrie, der Arithmetik oder der Philosophie Unendliches, könnten also nicht in dem endlichen Körper eingeschlossen werden, jedoch in der Seele, die als etwas Unkörperliches durch sich selbst bestehe.

In reifer Form gipfelten Avicennas Bemühungen später schließlich in seinem berühmten Gedankenexperiment vom »fliegenden Menschen«: Man stelle sich einen Menschen vor, der mit dreißig Jahren plötzlich ins Dasein getreten sei, ohne jegliche Sinneswahrnehmung im Raum schwebend und mit ausgestreckten Extremitäten, die sich nicht berührten. Könnte ein solches Wesen überhaupt etwas denken? Ja, antwortet Avicenna zuversichtlich, es habe ein Bewusstsein seiner selbst.

In einer philosophischen Schrift mit dem Titel »Der Ausgang und die Heimkehr« erzählt Avicenna eine Begebenheit, die sich am Hof in Buchara zugetragen hatte. Der Emir ließ für eine Gesellschaft Essen auftragen, als eine Sklavin, die sich beim Absetzen einer Platte tief bücken musste, von einer plötzlichen Lähmung befallen wurde und sich nicht mehr aufrichten konnte. Ein anwesender Arzt kam auf den Einfall, ihr die Hosen herunterzuziehen. Das Schamgefühl erzeugte nach Avicennas Diagnose eine aufwallende Hitze, die den Schleim in den Gelenken zum Schmelzen brachte, und die Störung war so schnell behoben, wie sie gekommen war. Dieses Vorkommnis diente ihm wieder als Beleg dafür, welche Macht die Seele über den Körper habe und weswegen sie letztlich von ihm unabhängig sei.

Die antik-griechische Medizin war materialistischer eingestellt. Galen betonte in einer Spezialschrift, die auch ins Arabische übersetzt war, wie die Seele von der Verfassung des Körpers abhängig sei. Über ihre Unsterblichkeit äußerte er sich schwankend und meistens skeptisch. Die in der arabischen Medizin schon von Avicennas Vorgängern eingeleitete Hinwendung zu seelischen Faktoren wirkte sich auf die Therapieformen aus. Avicenna erläutert im »Kanon«, wie wichtig es ist, dem Patienten Hoffnung zu machen und ihn durch Musik oder Anschauen einer schönen Landschaft in heitere Stimmung zu versetzen.

WELLCOME MEDICAL PHOTOGRAPHIC LIBRARY LONDON; MS OR. 155, FOL. 126 R

Diese anatomische Abbildung aus einer arabischen Handschrift des »Kanon der Medizin« zeigt das Arteriensystem und die Eingeweide.

Die medizinische Praxis sollte in Avicennas Leben eine wichtige Rolle spielen, obwohl er eigentlich etwas anderes werden wollte, nämlich ein juristisch-theologisch ausgebildeter Regierungsbeamter im Dienste der heimischen Dynastie der Samaniden in Buchara. Aber daraus wurde nichts. Von der östlichen Steppe herandrängende türkische Stämme machten der Samaniden-Herrschaft ein Ende, von Afghanistan her eroberte Mahmud von Ghazna eine Region nach der anderen. Dieser Herrscher, der auf wiederholten Einfällen nach Nordindien die hinduistischen Tempel plünderte, verstand sich auch in den beherrschten muslimischen Gebieten als Vorkämpfer des wahren Glaubens und verfolgte die Ketzer und die Philosophen. Avicenna hatte allen Grund, vor ihm auszuweichen. So flüchtete er zuerst nach dem nördlich gelegenen Choresm an der Mündung des Amudarja in den Aralsee, von dort nach Gurgan an der Südküste des Kaspischen Meeres. In Rayy, das in der Nähe des heutigen Teheran gelegen ist, übernahm er die Behandlung eines an Melancholie erkrankten Kronprinzen, dann wechselte er in den Dienst einer anderen Dynastie in Hamadan, wo er Leibarzt des regierenden Emirs wurde und zugleich die Funktion eines Ministers übernahm.

Flüchtling mit »aktivem Intellekt«

Nebenher arbeitete er an dem »Kanon in der Medizin« und an einer großen Enzyklopädie, die er »Das Buch der Genesung« nannte und in der alle anderen Wissenschaften systematisch dargestellt werden sollten. Seine Einkünfte gestatteten ihm, mit seinen Schülern einen besonderen Lebensstil zu pflegen, den einer von ihnen folgendermaßen geschildert hat: »Er hatte das erste Buch des ›Kanon‹ geschrieben, und jede Nacht versammelten sich die Adepten der Wissenschaft in seinem Haus. Ich las ein Stück aus der ›Genesung‹, ein anderer ein Stück aus dem ›Kanon‹. Waren wir damit fertig, erschienen Sänger aller Art, ein Weingelage mit allem, was dazugehört, wurde hergerichtet, und wir befassten uns damit. Der Unterricht fand in der Nacht statt, weil er tagsüber im Dienst des Emirs stehend keine Zeit hatte.«

Nicht jeder war mit Avicennas Amtsführung zufrieden. Einmal meuterte das Militär, setzte ihn fest, plünderte sein Haus und verlangte vom Emir die Hinrichtung, was dieser aber ablehnte. Ein Kolikanfall bewog den Emir schließlich, wieder Avicennas Dienste als Leibarzt in Anspruch zu nehmen und ihn auf seinem Posten zu bestätigen. Der aber plante von langer Hand einen erneuten Seitenwechsel und begann eine Korrespondenz mit dem Herrscher des weiter östlich gelegenen Isfahan, der mit dem in Hamadan verfeindet war. Die Absicht kam jedoch ans Licht, und Avicenna wurde auf einer nahe gelegenen Festung eingekerkert.

Beginn des »Kanon« in einer lateinischen Handschrift der Bibliotheca Amploniana in Erfurt. Sie zeigt einen lehrenden Christus mit anbetendem Mönch. Unten die Titelseite des 1593 in Rom erschienenen arabischen Kanondrucks.

STADT- UND REGIONALBIBLIOTHEK ERFURT; STURB CA 2° 257, FOL. 1 R

INSTITUT FÜR GESCHICHTE DER MEDIZIN HEIDELBERG

Während der Haft regte sich in ihm eine poetische Ader. Seine Einlieferung hatte er noch mit einem lockeren Vers kommentiert: »Du siehst, der Eingang ist geschafft, der Ausgang ist ganz zweifelhaft«. Danach verdichteten sich weltflüchtige Gedanken in einer kleinen Prosaerzählung voll rätselhafter Anspielungen und philosophisch-theologischem Tiefsinn.

Das Stück beginnt mit einem Spaziergang in einem umzäunten Park. Der Erzähler, der in der ersten Person redet, befindet sich in der Gesellschaft dreier zweifelhafter Freunde. Der erste, der vor ihm hergeht, lügt viel, trotzdem ist er von dessen Mitteilungen abhängig. Der zweite befindet sich zur Rechten, er ist reizbar und gleicht einem wilden Hengst oder einer Löwin, die ihr Junges verloren hat. Noch schlechter ist der dritte zur Linken, er ist gierig und gefräßig und benimmt sich wie ein geiler Hengst oder wie ein Schwein in einem Misthaufen. Symbolisiert werden durch diese Gestalten die Teile der menschlichen Seele, die schon Plato, dessen Dialoge Avicenna kannte, in ähnlicher Weise zerlegt und beschrieben hatte. Der erste lügenhafte Freund verkörpert den Komplex der inneren Sinne, welche die Informationen der fünf äußeren Sinne im Gehirn und in einer unzuverlässigen Weise verarbeiten und dem vernünftigen Seelenteil zuleiten, der von dem Ich-Erzähler verkörpert wird. Der zornige Freund zur Rechten ist der »mutvolle« Teil der platonischen Psychologie, der zur Abwehr von Gefahren antreibt, aber auch in sinnlose Aggressivität ausarten kann. Der zur Linken ist der »begehrende« Teil, der zur Ernährung und zur Fortpflanzung unentbehrlich ist.

Da begegnet der Gruppe ein in ewiger Jugend strahlender Greis, der sie freundlich begrüßt. Sein Name, der sich wie ein normaler arabischer Personenname anhört, lautet »Hayy ibn Yaqzan«, was sich übersetzen lässt als »Lebendiger, Sohn des Wachenden«. Der Wachende ist kein anderer als Gott selbst, von dem es in Sure 2, 255 heißt: »Nicht ergreift ihn Schlummer noch Schlaf.« In dem göttlichen Ausfließen durch die beseelten und mit Intelligenz begabten Gestirnsphären hindurch manifestiert sich, wie Avicenna in anderen Schriften ausgeführt hat, schließlich in der Mondsphäre ein Intellekt, den er in Anlehnung an eine schwer deutbare Stelle bei Aristoteles den »aktiven Intellekt« nennt, und er ist der »Lebendige«. Er beherrscht ▷

▷ die Welt unter dem Mond und erleuchtet in einem direkten Kontakt die Geister der richtig denkenden Philosophen, die so zu sicheren Wahrheiten gelangen, die sie allein aus dem Durcheinander der Erscheinungen niemals herausheben könnten.

Das folgende belehrende Gespräch ist ein Sinnbild für diese Einwirkung. Es handelt in verschlüsselter Form von der Fülle der Naturdinge, von den Planetensphären und ihren Bewohnern und schließlich von der Innenwelt der menschlichen Seele, aus der heraus sich ein Weg zum Schöpfer des Alls eröffnet. Bereits dem russischen Orientalisten Jewgenij E. Bertels war eine Verwandtschaft mit Dante Alighieris grandioser »Comedia« aufgefallen, die ansonsten ohne klassische oder biblische Vorbilder ist und wo Avicenna ein ehrender Platz in der Vorhölle unter den erlauchten, aber ungetauften Geistern des klassischen Altertums zugewiesen ist.

Das abstruse Konzept des »aktiven Intellekts« hat bei Avicenna zu ungewöhnlichen Konsequenzen geführt. So war es in seinem System nur natürlich, dass auch Erkenntnisse im Traum vermittelt werden, wie er es schon in seiner Jugend erfuhr. Besonders begabte Individuen konnten auch Informationen über konkrete Einzeldinge erhalten, sogar über zukünftige. Das waren die Propheten nach gut islamischer Lehre, jedoch war von Avicennas Voraussetzungen her nicht zu begründen, warum Mohammed der letzte Prophet gewesen sein sollte. In einer späteren Schrift mit dem lapidaren Titel »Hinweise und Ermahnungen« hat Avicenna ausgeführt, was den vom aktiven Intellekt in besonderer Weise inspirierten »Wissenden« alles möglich sein sollte. Dank ihrer intensiven Verbindung zu ihm können sie Regen oder auch Erdbeben machen, eine Epidemie, eine Überschwemmung oder eine Feuersbrunst abwenden oder wilde Tiere zähmen. Er erwähnt auch zustimmend die Praktiken türkischer Schamanen, die sich für eine Erleuchtung vorbereiten, indem sie einen glänzenden Gegenstand fixieren oder bis zur Bewusstlosigkeit rennen.

STAATLICHE KUNSTSAMMLUNGEN DRESDEN, MATHEMATISCH-PHYSIKALISCHER SALON

Arabische Gelehrte stellten die Sternbilder nach griechischem Vorbild dar – hier der Pegasus auf einem Himmelsglobus aus dem Jahre 1279.

Avicenna kam wieder aus der Haft frei, als der Herrscher von Isfahan mit seinem Heer nach Hamadan vorrückte. Der Gefangene, dem die Eroberung der Festung nicht unlieb gewesen sein dürfte, musste mit nach Hamadan evakuiert werden, wo er in der Stadt untertauchen konnte. Als wandernder Derwisch verkleidet gelang ihm schließlich die Flucht. In Isfahan wurde er am Hofe von Ala ad-Daula, der im Ruf eines Freigeistes stand, aufgenommen. Avicenna bereicherte mit seinem Wissen die gelehrten Unterhaltungen, stellte mit einem neu entwickelten Gerät astronomische Messungen an und hatte die Muße, weiter Schüler zu unterrichten. Auch die Arbeit am »Kanon der Medizin« und am »Buch der Genesung« schloss er nun ab.

Das Avicenna-Mausoleum in Hamadan ist weithin sichtbar.

Strapaziös war das Leben trotzdem, denn Avicenna musste den Fürsten auf seinen zahlreichen Kriegszügen begleiten. Auf einem, der sich gegen die ihm wohl bekannte Stadt Hamadan richtete, ist er im Alter von 58 Jahren an einer Kolik gestorben. Dort wurde er in einem schlichten Mausoleum beigesetzt. Als 1952 der tausendste Jahrestag seiner Geburt nach muslimischer Zeitrechnung begangen wurde, hat man seine Gebeine in eine monumentale Grabstätte überführt, deren schlanker Turm sich 64 Meter über die Stadt erhebt.

Eine solche Ehrung wäre in den Jahrhunderten nach Avicennas Tod nicht von allen gutgeheißen worden. Manchen Orthodoxen galt er als Ketzer, obwohl er sich

GLASGOW UNIVERSITY LIBRARY, MS. HUNTER 9, FOL. 1 R; BY PERMISSION OF THE SPECIAL COLLECTIONS DEPARTMENT

Diese Miniatur aus einer lateinischen Übersetzung des »Kanon« von Gerhard von Cremona zeigt Avicenna im Kreise seiner Schüler.

immer als Muslim gefühlt und nach dem Zeugnis seiner Schüler das fünfmalige tägliche Pflichtgebet nie versäumt hat. Aber sein unpersönlicher Gottesbegriff entsprach doch mehr dem der griechischen Philosophie als dem des Korans. Es hat sogar Bücherverbrennungen gegeben, dem auch das gewaltige »Buch der Genesung« zum Opfer fiel. Aber solche sporadischen Aktionen vernichteten nur Einzelexemplare und sind mit der Zensur in modernen totalitären Staaten nicht zu vergleichen.

Avicennas Einfluss auf Europa

Als große Autorität aber lebte Avicenna mit seiner Medizin weiter, die im Wesentlichen nur eine scholastische Zusammenfassung der Werke des Galen von Pergamon war. Damit war er auch im Abendland an den hier gegründeten medizinischen Fakultäten willkommen, und die lateinische Übersetzung des »Kanon« erlebte bis zum Jahr 1500 nicht weniger als 36 gedruckte Auflagen. Dann setzte sich im Zuge der Renaissance langsam die Meinung durch, man solle lieber direkt aus den griechischen Quellen schöpfen und brauche die arabische Vermittlung nicht. In jener Zeit reinigte man auch die medizinische Nomenklatur von den vielen ins Latein eingedrungenen arabischen Fremdwörtern. In der Anatomie sind heute davon nur noch die Vena saphena magna (die »große Rosenader« am Unterschenkel), das Ligamentum nuchae (das »Nackenband« im oberen Halsbereich) und die unbeholfenen Lehnübersetzungen der Dura mater und Pia mater als Bezeichnungen für die harte und den inneren Teil der weichen Hirnhaut übriggeblieben. (Die entsprechenden arabischen Ausdrücke hatten übrigens nur die schlichte Bedeutung »die harte zum Gehirn Gehörige« und »die zarte zum Gehirn Gehörige«; in lateinischer Bearbeitung wurde daraus eine »hartherzige Mutter« und eine »fromme Mutter«.)

Aber noch zu Beginn des 16. Jahrhunderts gab es – auch in Deutschland – Lehrer an den medizinischen Fakultäten, die weiterhin treu zu Avicenna hielten und die man deshalb »Arabisten« nannte. Der Streit mit den »Galenisten« artete oft in persönliche Beschimpfungen aus; es ging nicht anders zu als bei den Theologen. Hatte Martin Luther vor den Toren Wittenbergs die Urkunde der Bannandrohung und dazu einen Haufen »papistischer« Literatur den Flammen übergeben, tat Paracelsus, der große Reformator der Medizin, am 24. Juni 1527 auf dem Marktplatz in Basel ein Gleiches, indem er den »Kanon« ins Johannisfeuer warf.

Vor diesem Hintergrund ist es verwunderlich, dass 1593 ein römisches Verlagshaus das Wagnis einging, den Kanon im arabischen Original zu drucken. Aber der solide aufgemachte Band, nur leider auf der Titelseite durch einen schweren grammatischen Fehler entstellt, war für den Export in den Orient bestimmt, wie die nach muslimischer Art eingestreuten frommen Redensarten verraten. Auch dieses Unternehmen reiht sich ein in die aggressive Handelspolitik der italienischen Städte, die mit ihrem Export von Textilien, Papier und Glaswaren die Basarstraßen in den islamischen Ländern füllten und mit dazu beitrugen, die Herausbildung eines eigenen kapitalkräftigen und unternehmenden Bürgertums zu verhindern.

In der wirtschaftlichen und geistigen Stagnation der nachfolgenden Jahrhunderte konnte sich die medizinische Autorität Avicennas im Orient unangefochten behaupten, ohne dass die arabische Wissenschaft von den vielen europäischen Neuerungen Notiz nahm. Nur von Paracelsus wurde verspätet im 17. Jahrhundert einiges aus dem Lateinischen übernommen. Moderne arabische Medizinhistoriker sind auf den Gedanken verfallen, Avicenna wegen seiner allzu selbstsicher vorgetragenen Systematik für die Stagnation der ärztlichen Kunst in den islamischen Ländern verantwortlich zu machen. Aber Handbücher muss es immer geben, und es liegt an den allgemeinen gesellschaftlichen Verhältnissen, wenn sich kein Bedürfnis regt, ein besseres herauszubringen. ◁

Gotthard Strohmaier lehrt als Honorarprofessor am Seminar für Semitistik und Arabistik der Freien Universität Berlin.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Literaturhinweise

Al-Biruni. Ein Gelehrter, den das Abendland übersah. Von G. Strohmaier in: Spektrum der Wissenschaft 5/2001, S. 74.

Avicenna. Von G. Strohmaier, München 1999.

Die Zunft der Mailänder Apotheker und das Glasfenster vom heiligen Johannes dem Damaszener im Dom von Mailand. Von L. Belloni in: Zusammenhang. Festschrift für Marielene Putscher, hg. v. O. Baur u. O. Glandien, Köln 1984, Bd. 1, S. 177.

Weblinks zum Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

INGENIEURGESELLSCHAFT AUTO UND VERKEHR

Heißer Dampf aus kalter Flamme

De Dampfmaschin', dat iss enne jroße schwarze Kasten …«, so beginnt die wohl legendärste Erklärung der universalen Kraftmaschine des 19. Jahrhunderts, vorgetragen in Heinrich Spoerls heiterem Roman »Die Feuerzangenbowle«. Als seine Verfilmung 1944 die Heimatfront bei Laune hielt, war aber längst auch die Welt der Dampfmaschine nicht mehr heil. Zwar entstand noch 1941 das größte Exemplar und lieferte 22 000 Kilowatt, doch Elektrogeneratoren und Verbrennungsmotoren für Benzin und Diesel hatten der einstigen Hochtechnologie längst den Rang in Fabriken und Transportwesen abgelaufen.

Dementsprechend überrascht war die Kraftwerks- und Automobilbranche, als die renommierte Berliner Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr (IAV) in den 1990er Jahren eine moderne Form der Dampfmaschine entwickelte, die sowohl im Blockheizkraftwerk (BHKW) als auch im Kraftfahrzeug den Benzin- oder Dieselmotor ersetzen soll.

»Die Dampfmaschine mag auf den ersten Blick nostalgisch anmuten, aber sie verbrennt ihren Kraftstoff kontinuierlich, und ein solcher Prozess lässt sich heutzutage so genau steuern, dass kaum noch Schadstoffe frei werden!«, erklärt IAV-Manager Burkhard Heise. Demgemäß firmierte dieses Projekt in der Machbarkeitsstudie als Zero Emission Engine (ZEE). Seit wenigen Monaten vermarktet die aus der IAV hervorgegangene Enginion AG eine Weiterentwicklung unter dem Namen SteamCell.

Am Grundprinzip der Wärmekraftmaschinen hat sich nichts geändert: Ein Energieträger verbrennt und erhitzt Wasserdampf, dieser dehnt sich aus und setzt einen Kolben in Bewegung. Der Kolben treibt dann einen Stromgenerator oder ein Fahrzeug an. Wesentlicher Unterschied: der geschlossene Kreislauf für das umweltfreundliche Arbeitsmedium Wasser beziehungsweise Wasserdampf. Anders als bei üblichen Verbrennungsmotoren kann so kein Schmieröl versickern oder verbrennen. Die moderne Dampfmaschine verwertet die zugeführte Energie zudem wesentlich effektiver als ihre Vorfahren; ein ZEE-Pkw-Motor mit drei Zylindern erreichte in Tests das Niveau eines Diesel-TDI-Motors mit Hochdruckeinspritzung.

Bei den Motoren erfolgt die Umsetzung der thermischen Energie in einem dicht gepackten Bündel aus Verdampferrohren. Mit einem Druck von bis zu 500 Bar strömt der nun heiße Dampf in den Zylinder und verrichtet dort seine mechanische Arbeit. Anschließend gibt er in einem Wärmetauscher seine Restenergie ab, bevor er im Kondensator wieder flüssig wird. Die Restenergie dient zur Vorwärmung des Wassers.

Die Expansion im Hubraum erfolgt durchgängig bei einer Dampftemperatur von mehr als 500 Grad Celsius. Weder Öl noch Wasser kommen deshalb als Schmiermittel für den Kolben in Frage. Vielmehr sorgen spezielle Beschichtungen und Oberflächenstrukturen für eine möglichst verlustarme Trockenreibung zwischen einander berührenden Teilen.

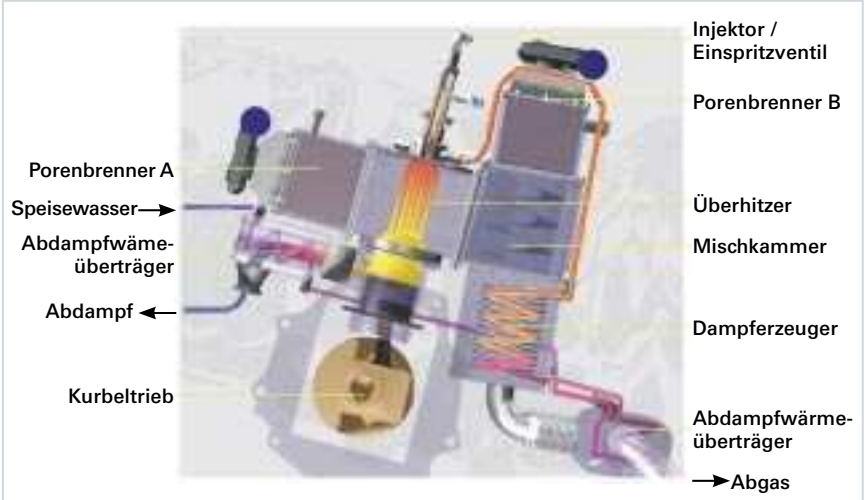
Die Machbarkeitsstudie hat gezeigt, dass sich ein solcher 50-Kilowatt-Motor in ein konventionelles Fahrzeug integrieren lässt. Die Kosten sollen bei Serienfertigung nur wenig über denen vergleichbarer Otto- oder Dieselantriebe liegen.

Leise rasen die Kolben

Vorläufig konzentriert sich Enginion mit seiner SteamCell auf den zweiten Anwendungsbereich: den Einsatz im BHKW. Kaum größer als ein PC, erzeugt diese Dampfmaschine bis zu 25 Kilowatt Wärmeleistung und sechs Kilowatt elektrischer Leistung – genug, um ein Einfamilienhaus mit Strom und Wärme zu versorgen. Obwohl sich im Innern Kolben bewegen, macht die SteamCell nach Herstellerangaben kaum ein Geräusch.

Benzin und Erdgas verbrennt die Maschine ebenso gut wie Rapsöl und Biogas. Zu diesem Zweck entwickelten die Ingenieure in Kooperation mit Wissenschaftlern des Öl-Wärme-Instituts Aachen einen Vergaser, der das Prinzip der »Kalten Flamme« nutzt. Mischt man Öl mit Luft, die zwi-

Kaum größer als ein PC, soll die „SteamCell" ein Einfamilienhaus mit Strom und Wärme versorgen können. Als Brennstoffe eignen sich beispielsweise Rapsöl und Erdgas.



ALLE ABBILDUNGEN: IAV / ENGINION

In den Dampfmotoren der Berliner IAV kommen Porenbrenner ohne sichtbare Flammenfront zum Einsatz. Dank kontinuierlicher Verbrennung bei weniger als 1200 Grad Celsius entstehen kaum Stickoxide.

DAS UNTERNEHMEN IM PROFIL

Die Berliner »Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr (IAV)« ist ein Ingenieurbetrieb mit rund 2000 Mitarbeitern. Der Jahresumsatz liegt bei knapp über 150 Millionen Euro. Als Management-Buy-Out entstand die Enginion AG. Die IAV entwickelt Motoren und Fahrzeugkonzepte bis zur Serienreife. Zu den Gesellschaftern zählen beispielsweise Volkswagen, Siemens und Freudenberg. Wichtigste Betätigungsfelder sind die Fahrzeugtechnik, der Komplex Motor/Antrieb sowie die Automobilelektronik. Am ZEE-Projekt waren verschiedene Unternehmen sowie der Lehrstuhl für Strömungsmechanik der Universität Erlangen und das Institut für Mineralogie der FU Berlin beteiligt.

schen 300 und 450 Grad Celsius warm ist, so findet eine chemische Reaktion statt, bei der langkettige Kohlenwasserstoffmoleküle in kürzere zerlegt werden. Bis zu zehn Prozent der im Brennstoff gebundenen Energie wird dabei freigesetzt, sodass der Vorgang bei etwa 480 Grad Celsius ohne weitere Energiezufuhr in Gang bleibt. Der so vergaste Kraftstoff verbrennt anschließend ohne sichtbare Flamme in einem Porenbrenner. Dessen Poren sind zwar groß genug, um eine thermische Reaktion zu erlauben, andererseits aber zu klein, um eine Flammenfront entstehen zu lassen.

Die Temperaturen liegen dabei um 1200 Grad Celsius, also unterhalb der Grenze, bei der sich Stickoxide bilden. Die SteamCell erfordert somit keinerlei Abgasbehandlung oder Katalysatoren. Sie emittiert zehnmal weniger Schadstoffe als konventionelle Heizungsbrenner und sogar hundertmal weniger als ein Pkw mit Abgaskatalysator. Außerdem lässt sich der Brenner im gesamten Leistungsbereich binnen Zehntelsekunden regeln.

Schon Ende 2004 soll diese Anwendung Serienreife erreichen, 2005 die Produktion starten. Dann wird der Preis einer SteamCell voraussichtlich bei 4000 bis 5000 Euro liegen – und damit sogar konkurrenzfähig zu konventionellen Heizkesseln sein. ◁

Der Autor **Martin Boeckh** studierte Physik und Geografie. Er ist freier Wissenschaftsjournalist in Gaiberg bei Heidelberg.

Spektrum der Wissenschaft
Zum Erfolg mit Online@dressen

➤ BASF
Chemikalien, Kunststoffe und Fasern, Veredlungsprodukte, Pflanzenschutz und Ernährung, Öl und Gas
www.basf.de

➤ Corporate Quality Akademie
MM – Themen per Fernlehre
Qualitätsmanagerlehrgänge
QM im Gesundheitswesen
www.cqa.de

➤ Dipl.-Ing. Runald Meyer VDI
Entwicklung, Konstruktion
Technische Berechnung
Strömungsmechanik
www.etastern.de

➤ DOK – Düsseldorfer Optik-Kontor
Kontaktlinsen online bestellen
www.dok.de

➤ Forschungszentrum Jülich
Brennstoffzellen
Technologie, Jobs, Dissertationen, Diplomarbeiten
www.fuelcells.de/jobs

➤ Forum MedizinTechnik und Pharma in Bayern e.V.
Innovationen für die Medizin
www.forum-medtech-pharma.de

➤ Institut für Wissenschaftsberatung
Suche nach deutschem Doktorvater/legale Promotionshilfe
www.drgraetz.de

➤ Kernmechanik – die neue Quantenphysik
Von Kernspin bis Kosmologie
www.kernmechanik.de

➤ Konrad-Zuse-Multimedia Show
Konrad Zuse Werk auf CD.
Geschichte des Computers.
www.zuse.info

➤ PARA BioScience GmbH – We Are Immunology –
Immunologische Testungen, in vivo-in vitro. Präklinik.
Antikörper auch durch Gensequenz
www.para-bioscience.com

➤ Prof. (apl.) Dr. habil. Harald Reiss
Energy technology, heat transfer, superinsulations, numerical simulations
www.haraldreiss.de

➤ Spektrum Akademischer Verlag
www.spektrum-verlag.com

➤ Sterne und Weltraum Verlag
www.suw-online.de

➤ Wissenschaft Online GmbH
Wir machen Wissenschaft transparent!
www.wissenschaft-online.de

Hier können Sie den Leserinnen und Lesern von Spektrum der Wissenschaft Ihre WWW-Adresse mitteilen. Für € 80,00 pro Monat (zzgl. MwSt.) erhalten Sie einen maximal fünfzeiligen Eintrag bestehend aus einer Branchenzeile, Firmenname und WWW-Adresse. Zusätzlich erscheint Ihre Anzeige als Link-Eintrag auf der Internetseite von Spektrum der Wissenschaft.

Informationen erhalten Sie direkt von
GWP media-marketing
Anzeigenverkauf Spektrum der Wissenschaft • Mareike Grigo
Telefon (02 11) 887-23 94 • Telefax (02 11) 887-23 99
E-Mail: m.grigo@vhb.de

Mit der Veröffentlichung Ihrer WWW-Adresse im Heft und im Internetangebot von Spektrum der Wissenschaft erreichen Sie eine gehobene Zielgruppe und gewinnen für Ihre Online-Kommunikation hohe Aufmerksamkeitswerte.

www.spektrum.de
Ihre Anlaufstelle für Wissenschaft im Internet

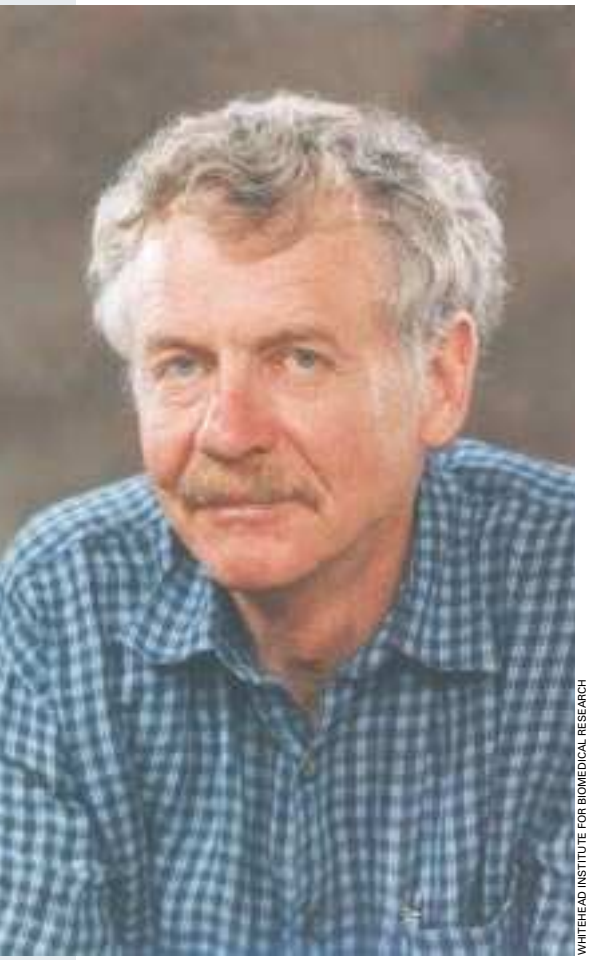
BIOMEDIZIN

Klonen von Menschen? Wissenschaftlich unhaltbar!

Wird in Kürze der erste geklonte Mensch geboren? Die Experimente des Italieners Severino Antinori stoßen weltweit auf Ablehnung. Der Molekularbiologe Rudolf Jaenisch, Träger des Robert-Koch-Preises, äußert sich über Chancen und Risiken des Klonens.

Von Andreas Jahn

Don't clone humans!« – so der Aufruf, den Rudolf Jaenisch zusammen mit Ian Wilmut im März 2001 in der Fachzeitschrift »Science« veröffentlichte. Die beiden Entwicklungsbiologen wissen, wovon sie reden. Jaenisch, der am Whitehead-Institut für biomedizinische Forschung in Cambridge (Massachusetts) arbeitet, hat maßgeblich die Verfahren zum Klonen von Säugetieren entwickelt. Wilmut vom britischen Roslin-Institut in der Nähe von Edinburgh hat mit seinem Team Wissenschaftsgeschichte geschrieben, als sie unter anderem das Klonschaf »Dolly« erzeugten (siehe Spektrum der Wissenschaft 4/1999, S. 34). Beide Forscher halten die Idee, Menschen reproduktiv zu klonen, also eine genetische Kopie eines Menschen zu erschaffen, für moralisch verwerflich und wissenschaftlich unhaltbar. Denn ihre Erfahrung lehrt, dass es keine »normalen« Klone gibt. Alle bisher geklonten Tiere, einschließlich »Dolly«, zeigten mehr oder weniger starke Schädigungen. Schon allein aus diesem Grund verbiete sich eine Anwendung am Menschen.



WHITEHEAD INSTITUTE FOR BIOMEDICAL RESEARCH

Der Molekularbiologe Rudolf Jaenisch hat die Verfahren zum Klonen von Säugetieren entwickelt, wendet sich aber strikt gegen das reproduktive Klonen von Menschen.

Wie sieht es jedoch mit dem so genannten therapeutischen Klonen aus, das in der öffentlichen Diskussion ebenfalls ins Zwielicht gerät? Hierbei soll in eine entkernte Eizelle der Zellkern einer Körperzelle transferiert werden, um so genetisch identische embryonale Stammzellen gewinnen zu können. Und diese Zellen gelten in der Medizin als wahre Wunderwaffe – könnten sie doch eines Tages Körpergewebe wieder ersetzen, das durch schwere Krankheiten zerstört worden ist.

Jaenisch zweifelt nicht daran, dass dieser Weg möglich und medizinisch sinnvoll ist – und stößt damit auf erhebliche ethische Bedenken in der Gesellschaft. Während sich das britische Unterhaus nach einer hitzigen Debatte dazu durchgerungen hatte, therapeutisches Klonen unter Auflagen zuzulassen, verbietet in Deutschland das Embryonenschutzgesetz, wie in vielen anderen Ländern auch, derartige Versuche an menschlichen Zellen.

Jaenisch wird jedoch nicht müde, sowohl in den USA als auch in seiner alten Heimat Deutschland für das therapeutische Klonen zu werben – und vor dem reproduktiven Klonen zu warnen. Dies war mit ein Grund für die Robert-Koch-Stiftung, Rudolf Jaenisch mit dem Robert-Koch-Preis des Jahres 2002 auszuzeichnen. Im folgenden Interview antwortet er auf die Fragen von Spektrum der Wissenschaft.

Spektrum der Wissenschaft: Herr Professor Jaenisch, zusammen mit Ian Wilmut haben Sie in »Science« vor den Gefahren des reproduktiven Klonens von Menschen gewarnt. Andererseits setzen Sie sich für das therapeutische Klonen ein. Sehen Sie hier nicht ein ethisches Dilemma?

Professor Rudolf Jaenisch: Es gibt viele ethische Dilemmata, mit denen wir leben müssen. Den Versuch, Menschen zu klonen, um neue Menschen zu produzieren, halte ich allerdings für unverantwortlich und wissenschaftlich unhaltbar. Völlig abgesehen von den schwer wiegenden ethischen Aspekten: Allein die wissenschaftlichen Probleme sind so groß, dass ein seriöser Wissenschaftler reproduktives Klonen von Menschen überhaupt nicht in Erwägung zieht. Denn wir wissen, dass die meisten, wenn nicht gar alle geklonten Tiere schwere Defekte zeigen. Diese Probleme stellen meiner Ansicht nach eine hohe, vielleicht sogar unüberwindliche biologische Barriere für das Klonen dar.

Spektrum: Und beim therapeutischen Klonen gilt das nicht?

Jaenisch: Hier gibt es zumindest aus wissenschaftlicher Sicht keine prinzipiellen Bedenken, sondern nur rein technische Probleme, die gelöst werden könnten. Natürlich ergeben sich bei der Anwendung des therapeutischen Klonens auf den Menschen ethische und moralische Probleme, die in der Gesellschaft diskutiert und entschieden werden müssen. In Großbritannien beispielsweise wurde eine solche Diskussion geführt. Deren Ergebnis, therapeutisches Klonen unter Auflagen zuzulassen, halte ich für biologisch sinnvoll und praktisch durchführbar.

Spektrum: Das therapeutische Klonen birgt sicherlich ein hohes medizinisches Potenzial. Doch ergäbe sich hier nicht die Gefahr eines Dammbruches, der eines Tages auch das reproduktive Klonen gesellschaftlich akzeptabel machen könnte?

Jaenisch: Ich stehe diesem Dammbruch-Argument sehr skeptisch gegenüber. Jede Erkenntnis kann gebraucht und missbraucht werden. Ich denke, es ist der fal-

sche Weg, nach einer Erkenntnis nicht zu suchen, nur weil sie möglicherweise missbraucht werden könnte.

Das therapeutische Klonen führt ja nicht unweigerlich zum reproduktiven Klonen. Zwar sind die ersten Stadien der beiden Verfahren identisch: Der Kern einer somatischen Zelle – also einer gewöhnlichen Körperzelle – wird in eine entkernte Eizelle transferiert, aus der sich dann ein Embryo entwickelt. Doch dann beginnt der Unterschied: Beim therapeutischen Klonen wird der Embryo in einem frühen Stadium – wenn er aus etwa hundert Zellen besteht – in eine Petrischale gegeben, und es entwickeln sich embryonale Stammzellen, die dann als Quelle für jeden somatischen Zelltyp dienen können. Beim reproduktiven Klonen hingegen wird der Embryo in den Uterus einer Frau implantiert, um zu einem Fötus heranzuwachsen. Da gibt es keine Grauzone. Entweder Sie implantieren oder Sie implantieren nicht. Wenn Sie implantieren, gehen Sie nach britischem Recht ins Gefängnis, wenn Sie den Klon in der Petrischale belassen, geschieht Ihnen in Großbritannien nichts.

Spektrum: Nun hat der italienische Arzt Severino Antinori angekündigt, die Geburt des ersten von ihm geklonten Menschen stehe bevor. Für wie gefährlich halten Sie ein derartiges Experiment?

Jaenisch: In den meisten Ländern der Erde ist reproduktives Klonen verboten. Insofern weiß ich nicht, wo Antinori sein unverantwortliches Experiment gemacht haben will. Sicherlich nicht in einem EU-Staat und sicherlich nicht in den USA. Aus Tierversuchen geht jedenfalls eindeutig hervor, wie das Resultat beim Menschen aussehen würde: Zunächst würden zahlreiche Embryos »verbraucht«, bis es überhaupt zu einer erfolgreichen Schwangerschaft käme. Und selbst diejenigen Babys, die es bis zur Geburt schafften, wären schwer krank.

Spektrum: Das therapeutische Klonen ist in Deutschland aufgrund des Embryonenschutzgesetzes verboten. Sehen Sie hier eine Behinderung für die Forschung in Deutschland?

Jaenisch: Ja, dadurch wird ein wichtiger Forschungszweig enorm behindert. Denn diese Forschung hat nicht nur ein großes Potenzial für die Therapie, sondern auch eine enorme wissenschaftliche Bedeutung für die Grundlagenforschung. Ein Beispiel: Schwere Krankheiten des Menschen, die von vielen Genen erzeugt werden – wie zum Beispiel Parkinson, Alzheimer oder Diabetes – können nicht am Tiermodell studiert werden, da es hierfür schlicht keine Tiermodelle gibt. Und beim Menschen, an dem sich Versuche verbieten, können wir diese Krankheiten nur beobachten. Wenn es jedoch gelänge, von einem Patienten eine Hautzelle zu entnehmen und daraus embryonale Stammzellen durch Klonen herzustellen, dann könnten wir an den Zellkulturen zum Beispiel nach Unterschieden suchen, wie sich Nervenzellen von dem Patienten und von einem normalen Individuum differenzieren. Auf diese Weise könnte man an die Ursachen und die pathologischen Mechanismen dieser Krankheit herankommen. Hier liegt eine ganz erhebliche Bedeutung dieser Technologie, die natürlich – wenn man sie verbietet – nicht realisiert werden kann.

Spektrum: Anfang 2002 hat der Bundestag beschlossen, die Forschung an menschlichen embryonalen Stammzellen unter ▷

Meilensteine der Wissenschaft

Peter Tallack (Hrsg.)
■ **Meilensteine der Wissenschaft**
In 250 Porträts entscheidender Ideen, Entdeckungen oder Erfindungen und ihrer Protagonisten veranschaulicht dieses Buch die Entwicklung der Wissenschaft von 35.000 vor Christus bis zum Jahr 2000. Das attraktive Bilderbuch und informative Nachschlagewerk in einem hat eine starke Sogkraft – wer einmal darin zu blättern anfängt, wird so bald nicht wieder aufhören wollen…
2002, 528 S., 350 Abb., geb.
€ 49,95, *ISBN 3-8274-1380-X*

aktuelle Lesetipps!

Abraham Pais
■ **Ich vertraue auf Intuition**
Abraham Pais, einer der besten Kenner von Einsteins Leben und Werk *„dokumentiert Einsteins private und veröffentlichte Ansichten über Gott und die Welt ganz ohne das übliche Pathos. Als guter Biograph zeigt er dem Leser die geistige Welt eines genialen Physikers und schließlich auch die Grenzen dieser Welt."* DIE ZEIT
1998, 357 S., br.
€ 9,95, *ISBN 3-8274-0394-4*

Richard Westfall
■ **Isaac Newton**
Der Autor *„komprimiert die gewaltige Materialfülle der Newtonforschung zu einer hervorragenden Einführung. Die ausgezeichnet lesbare deutsche Übersetzung dieses Buches findet nun hoffentlich einen weiten Leserkreis."*
Süddeutsche Zeitung
1996, 408 S., 14 Abb., geb.
€ 29,95, *ISBN 3-8274-0040-6*

! Bestellen können Sie mit der Bestellkarte vorne im Heft.
Oder: per Tel. 07071-935369, per Fax: 06221/9126338
oder per Mail: shop@spektrum-verlag.de

Spektrum Akademischer Verlag

www.spektrum-verlag.de

▷ Auflagen zuzulassen. Umstritten ist hierbei unter anderem die Stichtagsregelung, die besagt, dass nur Stammzellen verwendet werden dürfen, die vor dem 1. Januar 2002 gewonnen worden sind. Wie lange wird Ihrer Meinung nach diese Regelung Bestand haben?

Jaenisch: Ich weiß es nicht. Ich halte jedoch diese Stichtagsregelung für falsch – genauso falsch wie die Regelung in den USA, wo der 9. August 2001 als Stichtag gewählt wurde. Wir wissen doch, dass Stammzellen verschieden sind. Ihr Potenzial hängt davon ab, unter welchen Bedingungen sie isoliert und kultiviert worden sind. Das heißt, wenn man mit höchstens einem halben Dutzend Stammzellen arbeiten kann, wie das jetzt in den USA möglich ist, dann kommt man möglicherweise zu falschen Schlüssen. Ich finde das sehr problematisch – insbesondere, weil es inzwischen neue Methoden gibt, Stammzellen zu isolieren. Natürlich ist es besser, überhaupt eine Regelung zu haben, als alles zu verbieten. Aber ich halte diese Stichtagsregelung für einen faulen Kompromiss.

Spektrum: Wenn die Forschung in Deutschland Ihrer Meinung nach so stark behindert ist, könnten Sie einem Postdoktoranden aus Deutschland, der in Ihrem Labor in den USA arbeitet, dennoch raten, nach Deutschland zurückzukehren?

Jaenisch: Das hängt natürlich zunächst davon ab, welche familiären Bindungen er in Deutschland hat. Aber in der Forschung können viele Dinge, die in den USA selbstverständlich sind, in Deutschland nur schwer gemacht werden. Denken Sie zum Beispiel an die schwierige Genehmigung von Tierversuchen. Auch mit Stammzellen können Sie in Amerika – obwohl es da natürlich auch Beschränkungen gibt – leichter arbeiten als in Deutschland. Ich kenne viele Kollegen, die aus diesem Grund zögern, in ihrer Heimat weiterzuarbeiten.

Spektrum: Abgesehen von einem kurzen Forschungsaufenthalt in Hamburg haben Sie den größten Teil Ihrer wissenschaftlichen Karriere in den USA verbracht. Was muss Deutschland tun, um Forscher wie Sie wieder zurückzugewinnen?

Jaenisch: Eine sehr schwierige Frage. Deutsche Universitäten haben schon ihre Probleme. Die Versuche des Bundesforschungsministeriums, Lösungen zu finden, halte ich für sehr zaghaft und bezweifle, dass sie großen Erfolg haben werden.

Da ist zunächst die unterschiedliche Art der Forschungsfinanzierung. In den USA ist die Finanzierung ehrlich: Die National Institutes of Health zahlen, was die Forschung wirklich kostet – einschließlich der Verwaltungskosten, die ich mit meinem Antrag mit einwerben muss. Das heißt, die Verwaltung weiß genau, dass ihr Endgehalt davon abhängt, ob meine Anträge erfolgreich sind. In Deutschland ist das anders. Hier ärgert sich die Verwaltung höchstens, wenn ein Wissenschaftler einen DFG-Antrag bewilligt bekommt. Denn das bedeutet ja mehr Arbeit. Das ist eine unehrliche Art der Finanzierung, weil dabei nicht klar wird, was die Forschung wirklich kostet.

Spektrum: Und die Struktur-Probleme?

Jaenisch: Ein Postdoc, der von meinem Labor kommt und in den USA eine Assistenzprofessur annimmt, hat eine klare Karriere vor sich. Er weiß, dass sich nach sechs Jahren entscheidet, ob er eine Dauerstellung bekommt oder nicht. In Deutschland werden die jungen Forscher von Zeitvertrag zu Zeitvertrag weitergereicht – und haben schließlich doch keine Perspektive. Das schreckt viele ab.

Außerdem werden in deutschen Universitäten die Wissenschaftler für Dinge eingespannt, die der Forschung im Wege stehen. Sie müssen sich um die Verwaltung kümmern, sitzen in Komitees und werden durch die Lehre sehr stark beansprucht. Auch wir in Cambridge müssen in jedem Semester lehren, und das ist sehr wichtig. Aber die Wissenschaft ist das Wichtigste. ◁

Andreas Jahn ist Redakteur bei wissenschaft-online.

Weblinks zum Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

AM RANDE

Sterntaler und Mond-Moneten

Die Kommerzialisierung des Weltraums ist in vollem Gange. Jetzt hat eine US-Firma sogar die Lizenz zur Mondlandung erhalten.

»Houston, hier Meer der Ruhe. Der Adler ist gelandet!« Eine halbe Milliarde Fernsehzuschauer verfolgten 1969 Neil Armstrongs historische Gehversuche auf dem Erdtrabanten. Nun setzt die Menschheit erneut zum kühnen Sprung an: 2003 landet der erste gewerbliche Müll auf dem Mond.

Deponieren darf ihn dort die US-Raumfahrtfirma Transorbital. Zuvor – wer will schon Trümmer im Bild – soll ihre fliegende Kameraplattform Trailblazer hochauflösende Fotos schießen. Anschließend erfolgt der kontrollierte Absturz. Gemeinsam mit dem Raumschiff wird eine Kapsel voll irdischer Souvenirs entsorgt: Das Ticket für die persönliche Visitenkarte kostet nur ein paar tausend Dollar.

Ein kurzer Flug für die Trailblazer, doch eine enorme Rendite für das irdische Kapital. Der monetäre Grundgedanke ist so schlicht wie universell: »Hinauffliegen, Fotos machen, sie verkaufen – und das wieder und wieder.« Das »Gut der gesamten Menschheit«, so der Weltraumvertrag von 1967, fällt an private Geschäftemacher.

Zunehmend gerät die Kommerzialisierung des Weltraums zur Domäne von jedermann. Vor allem die Visionäre des preiswerten Weltraumtourismus heben ihr Schürzchen, um die Sterntaler hineinpurzeln zu lassen.

Weil der Spaceshuttle nur Großverdiener ins All verfrachtet, wollen die Privaten mit Billigtarifen im Streckennetz der Staatsfähre wildern. Die Anschubfinanzierung für die »Start-ups« steht bereit: Zehn Sponsoren-Millionen verspricht der X-Prize (www.xprize.org) demjenigen, der einen Dreisitzer in hundert Kilometer Höhe befördert und dies binnen zwei Wochen mit demselben Gefährt wiederholt. Mehr als zwanzig Teams, darunter Argentinier und Rumänen, konkurrieren um Preisgeld und lukrative Folgeaufträge.

Uns erwartet eine Zukunft unter Sternen: der Trip ins All als ultimatives Abenteuer, Fotos vom Mann im Mond und Werbebanner rechts und links der Milchstraße. In Wahrheit bleibt alles, fast, so wie zuvor: Unsere im Orbit kreisenden Nachfahren werden über immer mehr Weltraummüll klagen, irdischen Astronomen vor die Linse fliegen und tonnenweise irdische Ressourcen verheizen.

Thilo Körkel ist Physiker und Wissenschaftsjournalist in Frankfurt am Main.

Gemeinsame Leserreise von „Spektrum der Wissenschaft“ und „wissenschaft-online“

Costa Rica Tropenwaldreise (Frühjahr 2003)

Naturkundliche Entdeckungsreise mit Badeaufenthalt

Tropenvielfalt erleben im Regenwald

In Zusammenarbeit mit unserem Partner Waschbär-Reisen ist eine Leserreise für „Spektrum der Wissenschaft“ und „wissenschaft-online“ entstanden, deren Motto lautet:

Sehen – Erleben – Verstehen – Erhalten!

Das erwartet Sie auf dieser Reise:

- **Durchbrechen Sie das Zeitfenster** (Nacht- und Dämmerungsexkursionen)
- **Überwinden von Sichtbarrieren** (Übergang vom Boden- zum Baumkronenkosmos u.a. beim Canopy-Walk in Sta. Elena)
- **Wald-Architektur – wenn Bäume in den Himmel wachsen** (Staunen über Brett-, Stelz- und Luftwurzeln)
- **Gerüche – Aphrodisiaka der besonderen Art** (Blumen- und Fruchtdüfte)
- **Farben – Lippenstifte der Natur** (von der Interaktion Pflanze – Tier, u.a. Kolibri-Blumen)
- **Hörwelten – Kommunikationschaos zwischen Infra- und Ultraschall** (von Klopfkäfern und Fledermäusen)
- **Inventur der Artenvielfalt – La Selva:** Neuzeitliche Entdeckungsreisende (zu Gast bei Biologen und Pharmazeuten)
- **Prioritäten des modernen Umwelt- und Naturschutzes**

Reiseleitung: Dr. Jörg Kretzschmar, Alter 35 Jahre, Regenwald-Biologe, deutsch, Spezialgebiet Naturfotografie. Neben Dr. Kretzschmar wird die Reise von einem exzellenten einheimischen Reiseleiter begleitet, der Ihnen die Schönheiten des Landes näher bringt und Sie mit der Kultur und den Gepflogenheiten der Einheimischen vertraut macht.

Übernachtungen: Sie wohnen in gehobenen Hotels oder Cabinas. Cabinas sind vergleichbar mit unseren Ferienbungalows. Zumeist sind diese Cabinas noch mit einer Küche ausgestattet, die Sie z.B. zum Kaffeekochen zwischendurch gut nutzen können.
2 Nächte sind Sie inmitten des Urwaldes (exklusiv für diese Leserreise!) in einer Biologenstation untergebracht. Dort gibt es Stockbetten, die Geschlechter sind getrennt untergebracht, Gemeinschaftsdusche und Gemeinschaftsbad. Die Station hat Jugendherbergscharakter und mit Sicherheit werden Sie noch lange von der Zeit im Dschungel schwärmen.

Ihr Detailprogramm:

1. Tag: Ankunft in San José.
2. Tag: Gegenseitiges Kennenlernen, Baden in heißen Quellen.
3. Tag: La Fortuna – Der aktive Vulkan Arenal oder „wenn die Erde bebt ...“.
4. Tag: Das Ojoche-Projekt.
5. Tag: Caño Negro Tour.
6. Tag: Wasserfall La Fortuna und Transfer zum Children’s Rain Forest.
7. Tag: Children’s Rain Forest.
8. Tag: Childrens Rain Forest und Transfer nach Rincon de la Vieja.
9. Tag: Rincón de la Vieja und Hermosa Beach.
10. Tag: Erholung am Hermosa Beach.
11. Tag: Transfer nach Manuel Antonio.
12. Tag: Erholung am Traumstrand.
13. Tag: Zurück nach San José.
14. Tag: Abflug.

Termine:

Mittwoch, 12.02.03 – Donnerstag, 27.02.03
Sonntag, 06.04.03 – Sonntag, 20.04.03

Reisepreis:

€ 2.534,– p.P. im Doppelzimmer

Haben wir Sie neugierig gemacht?

Fordern Sie noch heute die ausführlichen Reiseunterlagen an:

Tel.: 06221/9126-743
Fax: 06221/9126-751
E-Mail: marketing@spektrum.com
Oder informieren Sie sich ausführlich im Internet unter www.wissenschaft-online.de/reisen

Spektrum DER WISSENSCHAFT

wissenschaft-online

Das mathematische Mitmach-Museum

Staunen, spielen, schwatzen: Das neu eröffnete »Mathematikum« in Gießen zeigt, wie anregend Mathematik sein kann.

Von Christoph Pöppe

Johannes hat durchaus gemischte Erinnerungen an seinen Mathematikunterricht. Sein Lehrer präsentierte den Schülern die bekannte binomische Formel als »klim plus bim in Klammern zum Quadrat«, um sie mit der rechten Seite der Gleichung »klim Quadrat plus zwei klim bim plus bim Quadrat« zum Lachen zu bringen. Na ja – öfter als zweimal kann man über den »Klimbim« nicht lachen. Der Lehrer hat aber den Witz immer wieder gebracht; und sonst ist ihm zum Motivieren auch nicht viel eingefallen.

Inzwischen ist der kleine Johannes Bundespräsident und lässt für die Journalisten zwei Holzkugeln gleichzeitig auf zwei verschiedenen Bahnen herunterrollen, einer geraden und einer längeren, gekrümmten. Dann kommt die Überraschung: Die Kugel mit dem längeren Weg ist zuerst am Ziel. Ob der Herr Bundespräsident sich vorstellen könne, warum? Nicht wirklich. Dafür hat das Interesse an der Mathematik nicht gereicht, siehe oben.

Die richtige Erklärung würde auch eine Weile dauern und eine reichliche Dosis Variationsrechnung samt Zubehör erfordern. Das Schöne ist: Man muss es sich nicht unbedingt erklären können. Das Phänomen handgreiflich zu erfahren und zu bestaunen ist auch gut. Die Abstraktion, die formale Durchdringung des Gegenstandes, das, was die Mathematik »eigentlich« ausmacht: Das kann nachkommen, muss es aber nicht.

Dies ist das Grundprinzip des neuen mathematischen Mitmach-Museums »Mathematikum« in Gießen, das am 19. November 2002 in Gegenwart des Bundespräsidenten und weiterer hoher Gäste feierlich eröffnet wurde. Damit konnte Albrecht Beutelspacher, Professor für Mathematik in Gießen und Gründer des Museums, den spektakulären Erfolg seiner langjährigen Bemühungen feiern.

Seit 1994 hat seine Wanderausstellung »Mathematik zum Anfassen« an mehr als hundert Orten mit großem Publikumserfolg gastiert und ist dabei ständig weiterentwickelt worden (Spektrum der Wissenschaft 8/1998, S. 104). Auf dem internationalen Mathematikerkongress 1998 in Berlin erhielt sie so etwas wie den Segen der Fachwelt.

Seitdem fand das Projekt eines Mathematikmuseums zunehmend Unterstützung. Die Stadt Gießen erwarb das ehemalige Hauptzollamt und stellte es dem Museum mietfrei zur Verfügung; 500 000 Euro kommen vom hessischen Wissenschaftsministerium und 1,4 Millionen von der Europäischen Union. Weitere Einnahmen kommen aus privaten Spenden und aus der Wanderausstellung, die neben dem Museumsbetrieb fortgeführt werden soll. Im laufenden Betrieb soll das Museum ohne Zuschüsse auskommen.

Kinder bringen ihre Eltern mit

Inhaltlich hatten Beutelspacher und sein Team Pionierarbeit zu leisten, denn ein Museum, das ausschließlich der Mathematik gewidmet ist, gab es bisher nicht. Immerhin konnten sich die Museumsmacher das Grundkonzept bei diversen »Science Centers« in aller Welt abschauen: der Phänomenta in Flensburg, dem Experimentarium in Kopenhagen, dem Technorama in Winterthur und dem Exploratorium in San Francisco.

Die bislang etwa fünfzig Exponate sind äußerst solide gebaut, damit sie dem täglichen Ansturm von Schulklassen mit Acht- bis Dreizehnjährigen standhalten. Nachmittags und am Wochenende kommen die Kinder wieder und bringen ihre Eltern zum Staunen mit, so die Erfahrung aus den Wanderausstellungen – und die Wunschvorstellung für die Zukunft des Hauses, die bislang über die Maßen in Erfüllung geht. Unter großem Gedränge und mit entsprechendem Lärm machen sich die Besucher

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Puzzlespiel mit mathematischem Hintergrund: Es gibt nur wenige Möglichkeiten, die »Drachen« und »Pfeile« der Penrose-Parkettierung in den vorgegebenen Rahmen zu legen. Die vollendeten Muster müssen regelmäßig wieder abgeräumt werden, damit den Besuchern der Anreiz zum Probieren bleibt.

ROLF WEGST

Albrecht Beutelspacher, der Gründer des Museums, mit einer Holzskulptur, die aus der richtigen Richtung betrachtet wie eine unmögliche Konstruktion aussieht

über die Zusammensetz-Aufgaben am Knobeltisch her, spielen mit dem Zahlenball, der durch den kraftvollen Luftstrom eines Ventilators in der Schwebe gehalten wird, und bewundern die wenigen Exponate, die nicht zum Anfassen sind. Darunter ist auch – die Bemerkung sei dem Spektrum-Redakteur gestattet – das fraktale Ikosaeder aus 1728 Dreiecks-Zwanzigflächnern, das die Teilnehmer unseres Geometriewochenendes in München im Januar 2001 aus Karton zusammengebastelt haben (Spektrum der Wissenschaft 3/2001, S. 96). »Wahnsinn« ist der Standard-Kommentar der Besucher.

Das Museum verfügt über weitere Flächen zum Ausbau. Seine unmittelbaren Nachbarn sind auf der einen Seite das Liebig-Museum, auf der anderen Seite die leer stehende alte Hauptpost, die ebenfalls einen hervorragenden Platz für ein Wissenschaftsmuseum zum Anfassen abgäbe. ◁

Christoph Pöppe ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

INFORMATION

▶ Mathematikum, Liebigstr. 8 (in unmittelbarer Nähe des Bahnhofs), 35390 Gießen, Tel. 0641-9697970, Fax 0641-97269420, www.mathematikum.de. Geöffnet Montag bis Freitag 9–18 Uhr, Donnerstag bis 20 Uhr, Samstag, Sonn- und Feiertage 10–18 Uhr. Eintritt 5,– (3,–) Euro.

www.spektrum.de

GEHIRN&GEIST

Unterschätzte Genies

Kindesentwicklung: Lange, bevor sie mit dem Sprechen beginnen, bilden Babys bereits Begriffe, um die Welt zu ordnen · Tinnitus: Die Ursachen quälender Ohrgeräusche · Führungskunst: Wie wir uns und andere bewegen · Orientierung: Physikalische, chemische und optische Informationen weisen Seehunden den Weg

Außerdem in dieser Ausgabe:

Oliver Sacks' neue faszinierende Fallstudie der Pianistin Anna H., die trotz intakten Sehvermögens keine Noten mehr lesen kann …

Die neue Ausgabe von **Gehirn&Geist**, »Unterschätzte Genies«, erscheint am 16.01.03 und kostet 7,90 €.

Vom Quant zum Kosmos

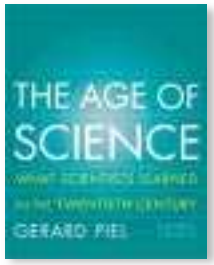
Die Quantentheorie hat unsere Vorstellungen vom Kosmos verändert, denn mit ihrer Hilfe rückt die Beantwortung großer Fragen näher: Wie ist das Universum entstanden? Wird es sich ewig ausdehnen? Woher kommt die Masse? Gibt es Dunkle Materie oder Dunkle Energie und wie sind Schwarze Löcher zu erklären? Das Dossier geht auf diese Fragen ein und macht mit unterschiedlichen Gedankenexperimenten der theoretischen Physiker vertraut.

Das Dossier **»Vom Quant zum Kosmos«** erscheint am 10.01.03 und kostet € 8,90.

DOSSIER

www.spektrum.de

WISSENSCHAFTSGESCHICHTE



Gerard Piel

The Age of Science

What Scientists Learned in the Twentieth Century

Basic Books, New York 2001. 460 Seiten, $ 40,–

Mehr als jedes andere war das jüngst vergangene 20. Jahrhundert von naturwissenschaftlichen Umbrüchen geprägt; und der US-Amerikaner Gerard Piel ist besonders berufen, davon zu erzählen. Sein Bildungsweg begann mit einem Geschichtsstudium in Harvard, für Mathematik und Naturwissenschaften hatte er anfangs ziemlich wenig Interesse. Das änderte sich aber, als er im Zweiten Weltkrieg Wissenschaftsredakteur der Illustrierten »Life« wurde. Auf einmal erkannte er, dass ein Magazin fehlte, das Wissenschaftler sachkundig über Nachbargebiete informierte und der breiten Öffentlichkeit einen Gesamteindruck von wissenschaftlicher Arbeit vermittelte.

Darum gründete Gerard Piel 1948 die Zeitschrift »Scientific American«, indem er einen über hundert Jahre alten Titel kaufte und mit neuen Inhalten wiederbelebte. Bis dahin hatte der alte »Scientific American« handfest und optimistisch über technische Apparate und Erfindungen berichtet, die versprachen, den Menschen das Leben zu erleichtern. Die neue Zeitschrift prägte Piel als Chefredakteur bis 1986; das Renommee der Zeitschrift, ihre internationale Verbreitung – seit 1978 gibt es die deutschsprachige Ausgabe unter dem Titel »Spektrum der Wissenschaft« – und ihre Grundhaltung sind Piels Verdienst.

Seine im besten Sinne amerikanische Grundhaltung ist aufklärerisch und demokratisch. Wissen wird nicht – wie im alten Europa nur zu oft – als exklusiver Besitz behandelt, als »Wissensschatz«, der den Inhaber auszeichnet und über die ignoranten Laien erhebt. Vielmehr gilt: Wer etwas weiß, muss es mitteilen können, sonst ist es nichts wert; was nicht zu verstehen ist, ist auch nicht zu gebrauchen.

Darum war es für Piels »Wissenschaftlichen Amerikaner« nie eine Frage, ob Wissenschaftler die Pflicht hätten, sich der Öffentlichkeit mitzuteilen, oder ob sie eine Verantwortung für die gesellschaftlichen Folgen ihres Tuns trügen. Praktisch jeder Artikel im »Scientific American« bejaht diese Fragen von selbst.

In seiner Rückschau auf das 20. Jahrhundert als »Age of Science« zieht Piel nun zwischen zwei Buchdeckeln die Bilanz all dessen, was er in seinem Leben als Wissenschaftsredakteur gelernt hat. Sein Überblick ist konkurrenzlos, seine Darstellungsweise historisch-erzählend oder, da die beschriebene Zeit nicht allzu fern liegt, im besten Sinne journalistisch. Piels Bericht schildert detailbesessen und souverän, wie Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie, Plancks Quantenphysik, Mendels Vererbungsgesetze und Darwins Evolutionstheorie entstanden und was wir seither über das Universum und uns selbst gelernt haben. Eine bessere Darstellungsweise für interdisziplinär interessierte Fachleute und wissbegierige Laien ist kaum vorstellbar: Mit Piel erleben wir moderne Wissenschaft erneut als menschliche Arbeit.

Allerdings ist die Darstellung nicht immer makellos, denn Piel hat eine eher unglückliche Liebe zu Zahlenbeispielen. Erstens überschätzt er deren Nutzen zur Veranschaulichung mikro- oder makroskopischer Zusammenhänge, und zweitens verrechnet er sich gelegentlich. So übersetzt er die Vernichtungsenergie der ersten Atombomben irrtümlich in die Beschleunigung des Fünffachen der gesamten US-Bevölkerung auf 10 Kilometer pro Sekunde. Auch bei seiner Darstellung des Planck'schen Wirkungsquantums bringt er Wirkung und Energie durcheinander.

Das Buch ist mit kolorierten Federzeichnungen reich illustriert. Sie geben dem auch sonst schön gestalteten Buch einen bibliophilen Touch, freilich um den Preis, dass manche Illustrationen mit ihren handgeschriebenen Beschriftungen unübersichtlich werden.

Alles in allem trotz kleiner Mängel ein absolut vorbildliches Werk in seinem Vermittlungsstil, zugleich Denkmal eines großen Journalisten und Vermittlers.

Michael Springer

Die erste Ausgabe des neuen »Scientific American«

Der Rezensent ist promovierter Physiker und ständiger Mitarbeiter bei Spektrum der Wissenschaft.

BIOPOLITIK

Volker Gerhardt

Der Mensch wird geboren

Kleine Apologie der Humanität

C.H.Beck, München 2002. 150 Seiten, € 12,50

Die modernen Biowissenschaften eröffnen eine geradezu ungeheuerliche Perspektive: Erstmals könnte der Mensch sich selbst nachhaltig verändern und somit zu einem ganz anderen, auch nicht-menschlichen Wesen werden. Spätestens seit den bahnbrechenden Erfolgen bei der Entzifferung des menschlichen Genoms wird daher leidenschaftlich darüber debattiert, ob die Freiheit der Forschung geradewegs zur Selbstabschaffung des Menschen führt. Bei diesem öffentlichen Streit um die »Biopolitik« ist Volker Gerhardt, Philosoph an der Humboldt-Universität Berlin, Leiter des DFG-Beirats zur Förderinitiative Bioethik und Mitglied des Nationalen Ethikrats, wiederholt in die Schusslinie der Kritik geraten. Nun hat er den Fehdehandschuh aufgenommen und eine lesenswerte Verteidigungsschrift für den »humanen Impuls der Forschung« vorgelegt. ▷

In den Medien, so Gerhardt, wird gern folgender Frontverlauf unterstellt: Auf der einen Seite die »Pragmatiker und Profiteure« der Forschung, die »noch nicht einmal die Verfassung achten, weil sie nur die Standortvorteile, ihre wissenschaftliche Karriere und ihre Patente im Kopf haben«. Und auf der anderen Seite die »politischen Moralisten«, die »rhetorischen Anwälte der Menschenwürde«, die sich »ihre hohen ethischen Zwecke durch kein noch so verlockendes Mittel entheiligen« lassen.

Gerhardt selbst sieht sich zwischen den Fronten. Denn er sympathisiert mit der seltenen Spezies der »moralischen Politiker«, Menschen also, die vor allem an ihren guten Taten gemessen werden wollen, und konzentriert seine Abneigung auf jene, die sich bevorzugt auf ihre guten Absichten berufen. In Anlehnung an Immanuel Kant charakterisiert Gerhardt jene »politischen Moralisten« als »Leute, die zwar öffentlich von Moral reden, in Wahrheit aber nichts für sie tun«.

Gerhardt misst die Menschenwürde an der Quote absolvierter Zellteilungen

So findet er es »unerträglich, dass angesichts der neuen Forschungsperspektiven die absolute Schutzwürdigkeit des Embryos beschworen wird, während im alltäglichen Umgang mit der unerwünschten Schwangerschaft die größte private Willkür herrscht«. Indem der Staat die Abtreibung zwar als rechtswidrig, aber nicht als strafbar qualifiziert, befinde er sich im latenten Konflikt mit seiner eigenen Verfassung. Ausgerechnet dieser Staat solle nun auch noch von den »politischen Moralisten« dazu gezwungen werden, »gegen ein explizites Grundrecht, nämlich die Forschungsfreiheit, zu verstoßen«. Das »größte Ärgernis« aber sei, dass man diejenigen, die diese Ungereimtheiten zur Sprache bringen, mit Vorwürfen überschütte.

Gerhardt plädiert für eine Wiederaufnahme der Verfassungsdiskussion über den Schutz ungeborenen Lebens. Er will einerseits den Schutz des menschlichen Keims garantieren, andererseits jedoch unter »strikten medizinischen Auflagen« Embryonenforschung gestatten. Daher schlägt er vor, den Anfang des individuellen menschlichen Lebens mit der Geburt und nicht mit der Verschmelzung von Ei- und Samenzelle zu definieren: »Schwangerschaft ist der Zustand, in dem die Frau das Kind nicht schon *hat*, sondern erst *bekommt*.«

Bei seiner Argumentation sucht der Autor bevorzugt nach historischen Zugängen: »Konfuzius, Salomon, der Prediger Kohelet, Buddha oder Jesus sagen uns heute immer noch mehr über die Grenzen des menschlichen Daseins als die Expeditionen ins Weltall oder die Kartierung des menschlichen Genoms.«

Bei seinen geradezu lustvoll vorgetragenen Attacken gegen die »politischen Moralisten« setzt Gerhardt nur selten einen wirklich groben Keil auf einen der groben Klötze. Dank großen Wissens und Schreibtalents gelingt es ihm immer wieder, den pessimistischen Alarmismus der Medien, die Larmoyanz des Zeitgeistes und die hier zu Lande verbreitete Neigung zur Dämonisierung von Technik als Anmaßung zu entlarven: »So ungeheuer die Herausforderung durch das Neue auch ist: Schlimmer als die Vergangenheit war, kann die Zukunft kaum werden.«

Warum sollte man überhaupt genetisch hochgerüstete Monsterwesen erschaffen, wenn doch »die Perfektion der Technik« schon heute den einzelnen Menschen davon entlaste, »selbst immer größer, schneller und schlauer zu werden«? »Der Mensch«, so Gerhardts Prognose, »kann die Selbstabschaffung der Menschheit nicht wirklich wollen.« Die Kontinuität unseres kulturellen Erbes werde sich auch bei der »biopolitischen Selbstbegrenzung des Menschen« als wirksam erweisen. Und trotz der großen Erfolge der Wissenschaft und des zu erwartenden starken Wandels in den Lebensbedingungen bestehe die Hoffnung, dass es auch weiterhin möglich sein wird, Ethik, Recht und Politik auf die unverändert gültigen Werte der Humanität zu verpflichten.

Dieses wiederholte »Kopf hoch« liest man gern – zumal, wenn einem das Wasser gegenläufiger Argumente bereits bis zum Halse steht. Dennoch ist dieses grundgescheite Buch an der Aufgabe gescheitert, aus dem Dilemma der biopolitischen Debatte zu führen.

Wer Humanität und Fortschritt gern als zwei Seiten einer Medaille betrachtet, dem sollten Kopf und Zahl gleichwertig sein. Gerhardts Argumentation gleicht jedoch einem Münzwurf, der auf eine neue Ethik der Zahl zielt: Menschenwürde bemessen an der Quote absolvierter Zellteilungen. Wird dem Embryo zu therapeutischen Zwecken seine Würde und Personalität genommen, mutiert er unweigerlich zur globalen Wirtschaftsware. Gerhardt hat übersehen, dass selbst der Aufruf zur Barmherzigkeit – an falscher Stelle ausgesprochen – inhumane Folgen haben kann.

Nicht jeder ist gleich ein »politischer Moralist«, der Gerhardts Lösungsformel »Der Mensch wird geboren« um die Formel »Der Mensch entwickelt sich aus einer Zygote« ergänzt wissen möchte.

Im Sinne der »biopolitischen Selbstbegrenzung des Menschen« könnte ein Gedanke Ernst Bendas helfen, den »humanen Impuls der Forschung« nachhaltig zu sichern: Der menschliche Embryo, so der ehemalige Verfassungsrichter, kann zwar vom Staat nicht wirksam gegen den Willen der Mutter geschützt werden, wohl aber gegen den Willen der Wissenschaftler.

Reinhard Lassek

Der Rezensent ist promovierter Biologe und freier Journalist in Celle.

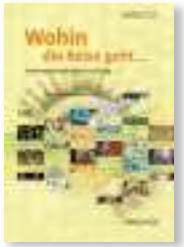
BIOLOGIE

Verband deutscher Biologen (Hg.)

Wohin die Reise geht …

Lebenswissenschaften im Dialog

Wiley-VCH, Weinheim 2002. 140 Seiten, € 15,90



Der Begriff »Lebenswissenschaften« geht über die schiere Biologie deutlich hinaus. Der vorliegende Sammelband, den der Verband deutscher Biologen im Auftrag des Bundesforschungsministeriums erstellt hat, befasst sich in zwölf Kapiteln mit Forschungsbereichen, in denen sich biologische, medizinische, ethische und technische Fragestellungen überschneiden: Gentechnik, Landwirtschaft, Biotechnologie, Bionik, Verhaltenslehre, Neurologie und Evolution des Menschen. Jedes Kapitel wird vervollständigt durch ein Glossar von Fachbegriffen, ergänzende Literaturangaben sowie Informationen zu den Verfassern.

Hauptthema des schmalen Buches ist die moderne Genetik. Im Rahmen des

Kopf einer Taufliege, in der beide Kopien des Gens *pax6* defekt sind. Diese Fliege bildet keine Augen aus.

Kopf einer normalen Taufliege mit großen Facettenaugen (rot).

groß angelegten Humangenomprojekts soll die genetische Information des Menschen bestimmt werden. Die Abfolge der Basen in der menschlichen DNA ist zwar im letzten Jahr ermittelt worden, was in den Medien als Riesenleistung herausgestellt wurde; um das menschliche Genom aber wirklich zu verstehen, müssen noch viele Experimente ersonnen und durchgeführt werden.

Andere Kapitel beschäftigen sich mit Anwendungen der Genetik. Jörg Schmidtke, Professor für Humangenetik an der Medizinischen Hochschule Hannover, beschreibt in »Gene und Krankheiten« exemplarisch drei Erbkrankheiten sowie ihre molekularen Ursachen und begründet damit die Sinnhaftigkeit prädiktiver genetischer Tests. Er versäumt auch nicht, darauf hinzuweisen, dass bei den so genannten Zivilisationskrankheiten wie Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Krebs und Diabetes weitere Faktoren eine Rolle spielen und die Kenntnis der genetischen Disposition allein nur sehr bedingt Aussagen über zukünftige Erkrankungsrisiken zulässt. Ein kurzer Abschnitt befasst sich mit den Folgen von Gentests für den Einzelnen und die Gesellschaft; hier wären Literaturverweise auf kritische Positionen zu diesem heiklen Thema sinnvoll gewesen.

Die Kapitel über Pflanzenzucht und Biotechnologie enthalten kurze Methodenbeschreibungen – und Rechtfertigungen. So seien höhere Erträgen und krankheitsresistente Nutzpflanzen durch »grüne Gentechnik« schneller und gezielter zu erreichen als mit den alten Arbeitsweisen Kreuzen und Selektieren. Mit anderen Verfahren können Rohstoffe und Energie eingespart werden oder Bakterien, Pflanzen und Tiere zur Produktion von Medikamenten veranlasst werden.

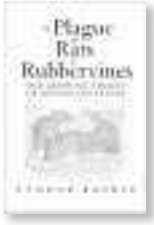
In dem Beitrag »Bio-Ethik« spricht die Wissenschaftstheoretikerin Bettina Schöne-Seifert aus Hannover wichtige Fragestellungen an, die sich aus den Methoden und Zielen von Genetik, Medizin, Pharmazie oder Reproduktionsbiologie ergeben. Die ironischen Abbildungen passen sehr gut zu den kritischen Überlegungen der Autorin. Indem sie die Bewertung von Embryonenforschung und Pränataldiagnostik von verschiedenen Standpunkten aus aufzeigt, macht sie deutlich, dass in der heutigen Gesellschaft kein Konsens über ethische Grundlagen zur Beurteilung wissenschaftlicher Entwicklungen besteht.

In diesem Kapitel findet sich ein programmatischer Abschnitt: »Immer weniger Menschen [verstehen], was genau in der naturwissenschaftlichen Forschung ›gemacht‹ wird. Die Kluft zwischen Öffentlichkeit und Wissenschaft ist sehr groß geworden. Vielen Menschen fehlt das Wissen, um wissenschaftliche Ziele und Mittel zu verstehen und einschätzen zu können – und viele Wissenschaftler haben es jahrzehntelang versäumt, diese Kluft gezielt zu verkleinern.«

Dem daraus abzuleitenden und auch auf dem Einband formulierten Anspruch wird dieses Buch nur bedingt gerecht. Die meisten Kapitel sind zwar verständlich geschrieben und ansprechend bebildert, sodass auch nicht vorgebildete Menschen einen knappen Überblick über den jeweiligen Forschungsbereich und dessen Zielsetzungen erhalten. Um aber begründet »mitentscheiden zu können, wohin die Reise geht«, bedürfte es einer vertieften Beschäftigung. Dazu allerdings müsste man die angegebene Literatur bemühen.

Brigitte Fellmann

Die Rezensentin ist Biologielehrerin am Werner-Heisenberg-Gymnasium in Bad Dürkheim.



ÖKOLOGIE

Yvonne Baskin

A Plague of Rats and Rubbervines

The Growing Threat of Species Invasions

Island Press / Shearwater Books, Washington DC 2002. 377 Seiten, $ 25,–

Der Erfolg des europäischen Kolonialismus zwischen dem 15. und dem 19. Jahrhundert hatte nicht nur eine politische und militärische, sondern auch eine biologische Dimension. In diesen Jahrhunderten wurden in Amerika, Australien und Neuseeland zahlreiche einheimische Pflanzen und Tiere durch konkurrenzkräftige Organismen, die vor allem aus dem Mittelmeergebiet stammten, verdrängt oder vollständig ausgerottet. Die Grundlagen der indigenen Naturnutzung wurden damit zerstört, und die Siedler hatten ein leichtes Spiel. Ab dem späten 19. Jahrhundert wurden deren Nachkommen allerdings selbst mit Problemen durch eingeführte Organismen konfrontiert und versuchten erstmals, den Strom von Pflanzen und Tieren einzudämmen. Nach der erfolgreichen politischen Abkopplung vom kolonialen Mutterland begann vielerorts eine Bewegung »ökologischer Unabhängigkeit«.

Diese Anstrengungen waren jedoch nicht mit sonderlich viel Erfolg gesegnet. Die Ausweitung der globalen Handelsströme und der Tourismus sorgen seit Jahrzehnten für immer mehr gewollte und un- ▷

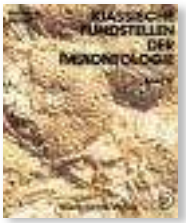
gewollte Mobilität von Organismen. Die Folgen sind dramatisch: Für mindestens zwanzig Prozent aller weltweit gefährdeten Tierarten gelten eingeführte Organismen als die wichtigste Bedrohung, entweder durch direkte Konkurrenz um Habitate oder weil sie leichte Beute für Räuber sind, gegen die ihnen die Evolution in der kurzen Zeit noch keine Verteidigungsmittel liefern konnte.

Das im Auftrag des *Global Invasive Species Programme* (GISP) von der amerikanischen Journalistin Yvonne Baskin verfasste Buch erzählt die tragische Geschichte der Tier- und Pflanzeninvasionen, die mit dem europäischen Kolonialismus einhergingen, stellt eindringlich die aktuellen Probleme dar und gibt ein anschauliches und engagiertes Bild der internationalen Suche nach wissenschaftlichen, ökonomischen und gesetzlichen Lösungen. Besondere Aufmerksamkeit widmet Baskin Australien und Neuseeland, die seit ihrer Kolonisierung ungemein hart von aggressiven eingewanderten Arten betroffen sind und heute unter allen Ländern die größten Anstrengungen unternehmen, den Transport von Organismen zu kontrollieren.

Yvonne Baskin neigt bei ihrer Darstellung in guter amerikanischer Journalisten-Manier manchmal ein wenig zu Atemlosigkeit und Alarmismus. Nichtsdestotrotz ist das von ihr gezeichnete Bild kompetent und fundiert. Die amerikanische Autorin bietet damit ein engagiertes und wichtiges Plädoyer gegen die drohende ökologische Homogenisierung der Welt.

Thomas P. Weber

Der Rezensent ist wissenschaftlicher Assistent am Institut für Tierökologie der Universität Lund (Schweden) und Buchautor.



PALÄONTOLOGIE

Werner K. Weidert (Hg.)

Klassische Fundstellen der Paläontologie

Band 4

Goldschneck, Korb 2001. 288 Seiten, € 45,50

Mehr als andere geowissenschaftliche Disziplinen lebt die Paläontologie von Zufallsfunden – durch die aufmerksame Beobachtung frischer Schichtflächen beim Steinabbau, gelegentlich durch gezielte Forschungsgrabungen – und durch passionierte Sammler, die an alten oder neuen Schürfen geduldige Nachlese halten. Entsprechend punktuell sind die Blicke, die sich dadurch in die erdgeschichtliche Vergangenheit eröffnen. Dennoch haben etliche so entdeckte Fossillagerstätten unsere Vorstellungen nachhaltig geprägt, weil sie spektakuläre Einzelstücke freigaben oder ganze Szenarien zu rekonstruieren erlaubten.

Dem besonderen Faszinosum dieser klassischen Fundkomplexe hat der Verleger und Herausgeber Werner K. Weidert eine ganze Buchreihe gewidmet. Im vorliegenden vierten Band stellen Autoren mit ausgewiesener Lokalkompetenz 22 bedeutende, überwiegend mitteleuropäische Fundgebiete vor, und zwar wesentlich ausführlicher als in den meisten Regionalmonografien. Die Altersskala reicht vom kambrisch-ordovizischen Tafelberg Kinnekulle in Südschweden bis zum Neandertal bei Düsseldorf, in dem der erste pleistozäne Menschenfund geborgen wurde.

Teilweise (im Bereich des Beines) ergänztes Skelett des Wasserfrosches *Palaeobatrachus* mit erhaltenem Körperumriss. Von dieser relativ häufigen Gattung sind aus dem Randecker Maar bei Ochsenwang am Nordrand der Schwäbischen Alb neben erwachsenen Tieren auch Kaulquappen nachgewiesen.

Die Schnauze des Meereskrokodils *Geosaurus gracilis* aus dem Steinbruch von Daiting bei Donauwörth

Weitere bemerkenswerte Fundstätten sind unter anderem die Silur/Devon-Grenze von Karlstejn (Tschechien), die unterpermische Ursaurierfundstätte Bromacker (Thüringer Wald), die Liasschichten von Kloster Banz (Fränkischer Jura), der in eher anderem Sachzusammenhang weltbekannte Meteoritenkrater Nördlinger Ries oder die tertiärzeitlichen Blätterkohlen von Rott (Siebengebirge) mit ihrer weltweit einzigartigen Erhaltung selbst der differenzierten Feinmorphologie geflügelter Insekten.

Jede Fundstättenbeschreibung umfasst die genaue Stratigrafie, die Erschließungs- und Forschungsgeschichte, ferner Zuwegung, den heutigen Zustand, Sammelmöglichkeiten sowie Museen oder Privatsammlungen, in denen man die schönsten oder bedeutendsten Fundstücke im Original bewundern kann. Der mit Karten, Grafiken, Tabellen und zahlreichen Farbfotos prächtig ausgestattete Band ist – wie seine Vorgänger – wiederum eine lesenswerte und faktenreiche Handreichung für alle, die vor Ort etwas abseits üblicher touristischer Pfade ein buchstäblich vertiefendes Landschaftserlebnis genießen möchten.

Bruno P. Kremer

Der Rezensent lehrt am Institut für Biologie und ihre Didaktik der Universität zu Köln.

NEU

ASTRONOMIE HEUTE

SKY & TELESCOPE | WWW.ASTRONOMIE-HEUTE.DE

Astronomen aufgepasst

hier ist eine gute Nachricht – eine sehr gute sogar:
Ab 13. Februar 2003 gibt es eine neue hochqualitative Zeitschrift für Einsteiger, aktive Beobachter und Weltraum-Interessierte! ASTRONOMIE HEUTE, das populäre Magazin für Astronomie und Raumfahrt – die deutsche Ausgabe von Sky & Telescope, der seit über sechzig Jahren unumstrittenen weltweiten Nummer eins unter den Astronomie-Titeln. Verlegt wird das zweimonatlich erscheinende Magazin vom Verlag Spektrum der Wissenschaft. Insgesamt zwanzig Redakteure in den USA und Deutschland sowie eine Vielzahl von renommierten Autoren sorgen dafür, dass Sie mit ASTRONOMIE HEUTE fortan immer auf Augenhöhe mit den Sternen sind!

Besondere inhaltliche Schwerpunkte von ASTRONOMIE HEUTE liegen auf dem Gebiet der Himmelsbeobachtung für Einsteiger und Fortgeschrittene sowie bei Testreports und Übersichten im Bereich Teleskoptechnik und astronomisches Equipment. Beobachtungstipps, aktuelle News, faszinierende Fotostrecken und exklusive Kolumnen (»Kippenhahns Sternstunde«) runden das einzigartige redaktionelle Angebot ab.

Lernen Sie ASTRONOMIE HEUTE kennen und profitieren Sie von den Vorteilen eines Mini-Abonnements

- ✔Preisvorteil: Testen Sie 2 aktuelle Ausgaben von ASTRONOMIE HEUTE zum Sonderpreis von nur 9,– €. Die Versandkosten Inland sind in diesem günstigen Preis bereits enthalten.
- ✔Kostenlose Kleinanzeigen: Als Abonnent von ASTRONOMIE HEUTE können Sie eine kostenlose Kleinanzeige (bis zu 5 Zeilen) in ASTRONOMIE HEUTE sowie im Internet schalten.

Ab 13.02.03 im Handel erhältlich

Eine Bestellmöglichkeit finden Sie auf den Seiten 101/102 oder im Internet:

www.astronomie-heute.de

Verdammt lang her

Das World Wide Web erkundet seine eigene Geschichte.

Von Thilo Körkel

Wer wird unseren Kindern die rasante Geschichte des Internets erzählen? Ihnen berichten von den Tagen, als in immer schnellerer Abfolge neue Seiten entstanden und sich das Gesicht des Netzes täglich wandelte? Wer kennt noch die ungezählten Seiten, die gerade einmal ein paar Tage oder Wochen alt wurden, um sogleich von »Updates« und »Relaunches« begraben zu werden? Nur noch einige tote Links künden von Vergangenem: Die virtuelle Welt verwischt ihre eigenen Spuren.

Dem drohenden Gedächtnisverlust der digitalen Epoche stemmt sich das »Internet Archive« (www.archive.org) in San Francisco entgegen: Die rührige Non-Profit-Organisation, die auf Stiftungsgelder und Datenschenkungen angewiesen ist, baut eine digitale Bibliothek für historische Internetseiten und andere digitalisierbare Kulturgüter wie Filme, Bücher und Konzertmitschnitte auf. Das »Archive« versteht sich als Retter dessen, was jenseits und auch innerhalb des kulturellen Mainstreams dem Vergessen anheim fallen könnte.

Das Internet in seiner ganzen Vielfalt und Vergänglichkeit wird so zum Kulturerbe. Wer unter www.archive.org/web/web.php eine Web-Adresse in die »Wayback«-Maschine eintippt und anschließend ein Datum auswählt, bekommt die dazugehörige Seite auf den Schirm, so wie sie vor Jahren aussah. Web-Historiker können das Netz jetzt in der Rückschau erforschen: Wie textlastig präsentierte sich der Internet-Dinosaurier Yahoo noch Mitte der 1990er Jahre, und welche Bücher waren damals die Renner bei Amazon.de?

Auch anspruchsvollere Fragen beantwortet das »Archive«: Aus sicherem Abstand lässt sich verfolgen, wie angesichts des Jahrtausendwechsels die weltweite »Y2K«-Panik um sich griff. Manchem Thema widmet das Archiv eigene Sammlungen: Die Reaktionen der Web-Welt auf den 11. September 2001 sind ebenso dokumentiert wie die US-Präsidentschaftskandidaturen im Netz des Jahres 2000.

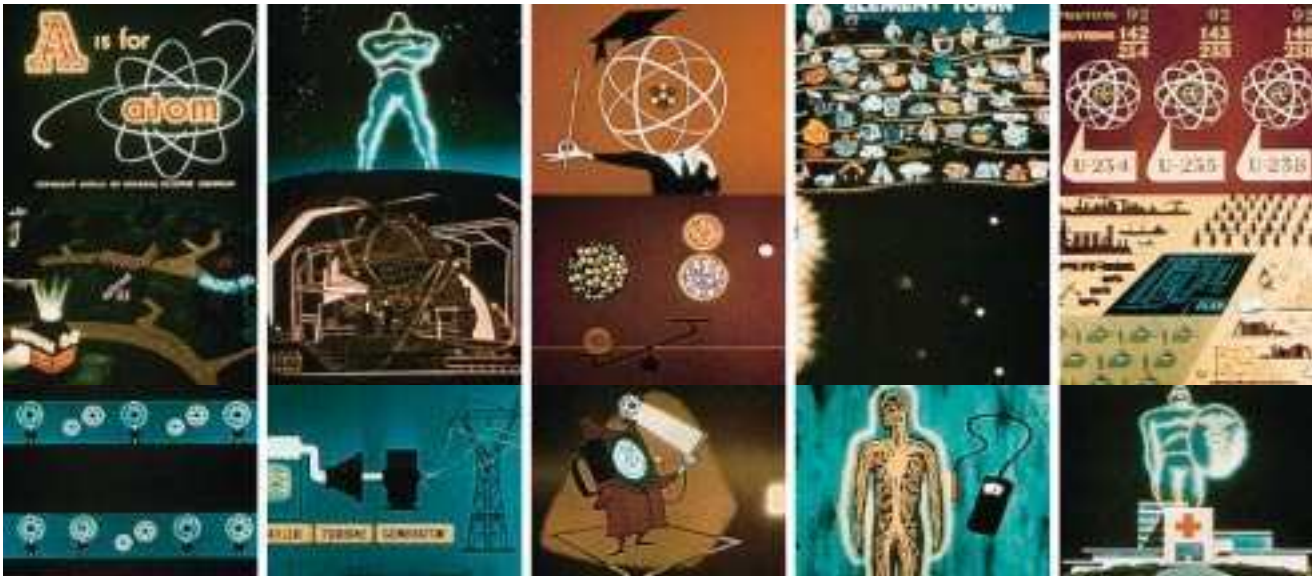
Über zehn Milliarden Seiten – Tendenz exponentiell steigend – sind auf den Magnetbändern und Festplatten dieser »Wayback«-Maschine gespeichert, deren Name soviel wie »Rückweg« oder auch »verdammt lang her« bedeutet. Dabei reicht ihr Gedächtnis gerade einmal bis 1996 zurück; damals dauerte der Boom des World Wide Web schon drei Jahre an.

Dagegen lässt sich die Filmgeschichte bis in die 1920er Jahre verfolgen, wenn auch nur in rudimentärer Auswahl (www.archive.org/movies/movies.php). So präsentiert das Archiv unter anderem einen Fundus so genannter »ephemerals« – kurzlebiger Werbe-, Industrie- oder Amateurfilme. Bert, die Schildkröte, versteckt sich unter ihrem Panzer, um Kindern das richtige Verhalten im Fall eines atomaren Angriffs zu erklären (»Duck and cover«, www.archive.org/movies/details-db.php?collection=prelinger&collectionid=19069). Und die Erziehungsfilme der späten 1940er Jahre heben nach dem Muster »Gutes Mädchen, böses Mädchen« den mahnenden Zeigefinger (»Are you popular?«, www.archive.org/movies/details-db.php?collection=prelinger&collectionid=00014).

Einen Klick weiter dreht sich das Netz wieder um sich selbst: Im »Net Café« wird Nicholas Negroponte interviewt, der als Gründer des MIT Media Lab und Autor von »Being Digital« zur Web-Legende wurde (www.archive.org/movies/details-db.php?collection=netcafe&collectionid=624).

Im Reich der elektronischen Texte (www.archive.org/texts/texts.php) lässt sich schließlich auch die Frühzeit des Netzes erforschen: Interviews und Zeitungsausschnitte dokumentieren die Entwicklung des militärischen Internet-Vorgängers Arpanet. Dieselbe Adresse öffnet zudem den Weg in eine ganz andere Welt: Die ersten tausend Bände des »Million Book Project« stehen hier ebenso im digitalen Regal wie Kinderbücher in 15 Sprachen aus 27 Kulturen. Deutschen Autoren verhilft das »Archive« hingegen kaum zu Ehren – doch dafür gibt es ja www.gutenberg2000.de.

Der Autor ist Diplom-Physiker und Wissenschaftsjournalist in Frankfurt am Main.



»A is for atom«: Ein Werbe-Trickfilm von General Electric aus den frühen 1950er Jahren erklärt die friedliche Nutzung der Atomkraft.

HTTP://WWW.ARCHIVE.ORG/MOVIES/DETAILS-DB.PHP?COLLECTION=PRELINGER&COLLECTIONID=17225

PREISRÄTSEL

Hasch mich

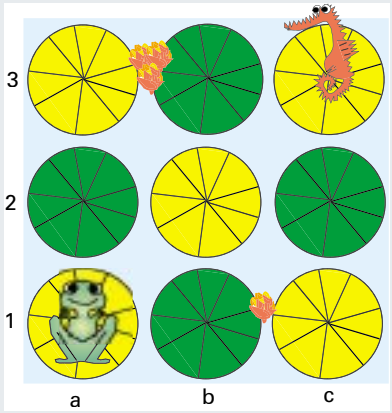
Von Pierre Tougne

Quako und Seepferdchen spielen Hasch mich. Sie haben in ihrem Teich ein Feld mit 3×3 Seerosenblättern. Beide hüpfen abwechselnd von Seerose zu Seerose. Ziel des Spiels ist es, auf der Seerose zu landen, auf welcher der andere gerade sitzt. Quako hüpft immer nur senkrecht oder waagerecht, aber so weit er will. Seepferdchen hüpft im Rösselsprung, also 2 Seerosen waagerecht und eine senkrecht oder zwei senkrecht und eine waagerecht. Zu Beginn des Spiels sitzen beide einander in den Ecken gegenüber. Quako beginnt als Erster zu springen.

Seepferdchen (S) hat auf dem 3x3-Feld keine Chance gegen Quako (Q):

1. Q auf c1; S auf a2
2. Q auf c2; S auf c3 (oder auf c1)
3. Q auf c3 (bzw. c1) und Seepferdchen ist gefangen.

Wie steht es auf Feldern der Größe 4×4, 5×5 und 6×6? Mit wie vielen

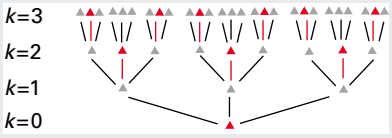


Sprüngen kann Quako auf jeden Fall den Sieg erzwingen?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg. Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir drei Strategiespiele »Blokus«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 14. Januar 2003, eingehen.

Lösung zu »Nervöse Kippungen« (November 2002)

Die Wahrscheinlichkeit, dass das Tetraeder nach acht Kippungen wieder auf der roten Seite zu liegen kommt, beträgt 547 zu 2187.



Der Baum oben zeigt alle denkbaren Kippverläufe bis zur dritten Kippung. Rot sind dabei die Fälle markiert, bei welchen die rote Fläche auf dem Tisch liegt, und grau die übrigen. r_k sei die Anzahl der Fälle, bei denen nach der k-ten Kippung rot auf dem Tisch liegt, und g_k die Anzahl der übrigen (»grauen«) Fälle. Jeder rote Zustand entsteht aus einem grauen, und aus jedem grauen Zustand kann genau ein roter hervorgehen. Deshalb gilt: $r_{k+1} = g_k$.

Insgesamt gibt es für das Tetraeder 3^k mögliche Kippverläufe mit k Kippungen (jede Kippung verdreifacht die Anzahl der Möglichkeiten). Also gilt $r_k + g_k = 3^k$.

Aus den beiden Gleichungen folgt die Rekursion $r_{k+1} = 3^k - r_k$.

Das Verhältnis »Anzahl roter Fälle zu Anzahl aller Fälle« und damit die Wahrscheinlichkeit für rot nach k Kippungen ist $p_k = r_k / 3^k$. Das lässt sich für $k = 8$ noch mit dem Taschenrechner berechnen. Oder (eleganter): Man nutzt aus, dass $p_k - 1/4$ eine geometrische Folge mit dem Faktor $(-1/3)$ ist, findet auf diesem Wege die explizite Formel

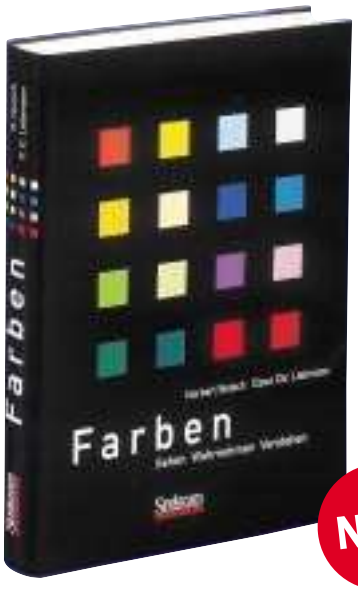
$$p_k = \frac{1}{4} + \frac{3}{4}\left(-\frac{1}{3}\right)^k$$

und gewinnt zusätzlich die Auskunft, dass die Wahrscheinlichkeit für »rot« im Grenzwert großer k gegen 1/4 strebt.

Die Gewinner der zehn schwebenden Kugelschreiber »U.F.O. Pen« sind Michael Kirschner, Berlin; Helge Janssen, Eisenhüttenstadt; Michael Bauer, Süßen; Norbert Krämer, Mannheim; Franz Pichler, Wien; Margret Herdt, Osnabrück; Thankmar Sauerland, Hagen; Bernhard Marzetta, Riehen (Schweiz); Friederike Lattig, Abtwil (Schweiz); und Karl-Heinz Ulonska, Dortmund.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

Der Farbtupfer im Bücherregal!



NEU!

Norbert Welsch / Claus Chr. Liebmann

■ **Farben**

Warum sind nachts alle Katzen grau, und warum ist der Himmel blau? Wie funktioniert ein Farbfilm, und warum haben alle Regenbogen die gleiche Farbe? Wie wirkt rot auf unsere Psyche, und welche Rolle spielen Farben in der Malerei? Welche Reaktionen laufen bei Haarfärbemitteln ab, und was passiert beim Grauen Star?
Diese und weitere vielfältige und faszinierende Aspekte zu Farben sind in dem großformatigen Sachbuch zusammengestellt. Ein Buch zur Wunderwelt der Farben, das man immer wieder gerne zur Hand nehmen wird, sei es wegen der ansprechenden Fotografien oder wegen der gut erklärenden Texte.
2002, ca. 420 S., 300 Abb., geb.
€ 49,95; *ISBN 3-8274-1383-4*

Noch mehr sehen!

Keith Devlin

■ **Muster der Mathematik**

„Die Ziehung der Lottozahlen, Knoten im Bindfaden, gepackte Äpfel am Marktstand gehören zu den Mustern der Mathematik, die mehr ist als nur Zählen und Rechnen. Devlin macht das mathematische Denken zu einem spannenden Vergnügen!" 3SAT
2002, 380 S., 150 Abb., br.
€ 14,95, *ISBN 3-8274-1325-7*

Irvin Rock

■ **Wahrnehmung**

Wie das Sehsystem aus einem mehrdeutigen Hell-Dunkel-Muster auf der Netzhaut ein wirklichkeitsnahes Bild rekonstruiert, illustriert Irvin Rock in diesem „Klassiker" an vielen im Wortsinne anschaulichen Experimenten, die der Leser anhand der Abbildungen selbst nachvollziehen kann.
1998, 256 S., br.
€ 14,95, *ISBN 3-8274-0478-9*

www.spektrum-verlag.de

! Bestellen können Sie mit der Bestellkarte vorne im Heft. Oder: per Tel. 07071-935369, per Fax: 06221/9126338 oder per Mail: shop@spektrum-verlag.de

Spektrum Akademischer Verlag

LINEARE ALGEBRA – ETWAS ANDERS

Wie kommt man nach Disentis?

Ein im Skiurlaub erfundenes Legespiel führt unversehens auf Gleichungen in einem Zahlensystem, in dem 1+1=0 ist.

Von Achim Clausing

FURKA-OBERALPBAHN

Disentis liegt am Rhein, da wo der Fluss noch ganz jung und von hochalpinen Gipfeln umgeben ist. Es ist ein schöner Ort, man kann dort eine alte Benediktinerabtei besichtigen, wandern, nach Gold schürfen und vor allem wunderbar Ski fahren.

Wie kommt man nach Disentis? Am besten nimmt man die Bahn, genauer: die feuerrote Furka-Oberalpbahn, entweder von Chur aus durch das wildromantische Rheintal oder von Andermatt aus über den im Winter verschneiten Oberalppass.

Aus ganz anderer Sicht stellt sich die Titelfrage, wenn man beim Skifahren hoch über Disentis von einem Schlechtwettereinbruch im Restaurant festgehalten wird. Die Bergbahn hat den Betrieb eingestellt, die Talabfahrt ist im Nebel verschwunden und der siebenjährige Sohn mit dem Verzehr von Ovomaltine und Kuchen höchstens fünf Minuten lang ausgelastet. Was tun? Man macht aus der Frage »Wie kommt man nach Disentis?« ein Spiel.

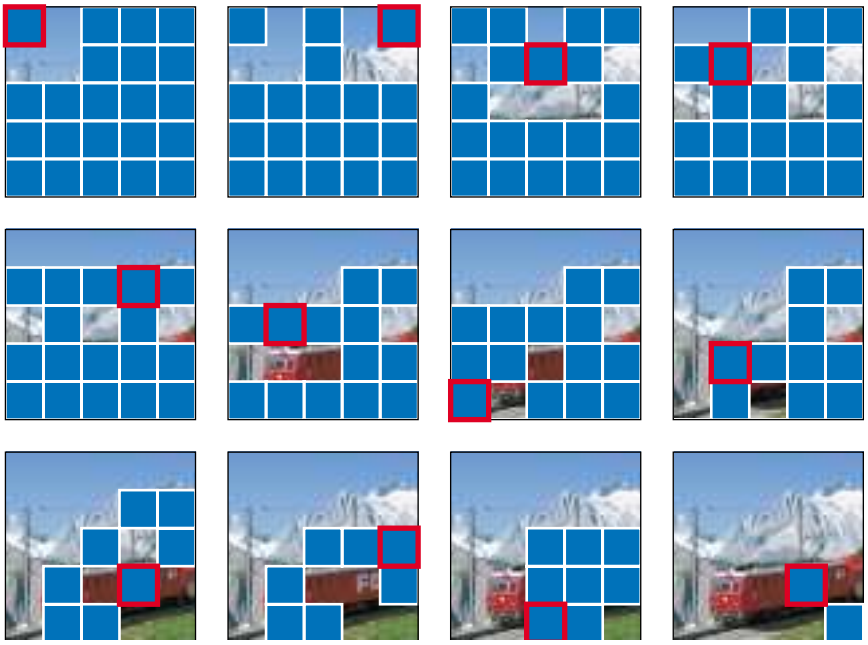
Das geht so: Man greift sich eines der schönen Fotos aus den zahlreich herumliegenden bunten Prospekten und zerschneidet es in 25 quadratische Teile. Diese werden ausgelegt und mit ihrer Bildseite nach unten gedreht (die Rückseiten sind blau). Der Filius darf nun, so oft er mag, eines der blauen verdeckten Teilbilder aussuchen und muss dann sämtliche benachbarten Zettel (bis zu acht Stück) umdrehen – aber nicht den ausgesuchten Zettel selbst. Um dessen Bild sichtbar zu machen, muss er einen blauen Nachbarn zu Hilfe nehmen. Spielziel ist es, das ganze Bild wieder sichtbar zu machen – dann ist man »nach Disentis gekommen«. Unter den umzudrehenden Nachbarn sind häufig auch solche, die eigentlich schon richtig liegen. Deren Bildmotive müssen leider wieder nach unten gedreht werden.

So dauert das Spiel, ganz im Sinne des Erfinders, eine ordentliche Weile. Lange bevor wir damit »nach Disentis gekommen« sind, hat die Seilbahn wieder geöffnet, und die Familie schwebt zufrieden in den eben noch so unerreichbaren Ort hinunter.

Später, der Sohn hat die Sache längst vergessen, plagt den Vater die Neugierde: Wäre es überhaupt möglich gewesen …? Und falls ja, wie schwierig ist das Spiel? Wie findet man eine Lösung? Gibt es vielleicht mehrere Lösungen? Wie sieht es für andere Zerschnipselungen anstelle von 5×5 aus?

Klar ist zunächst nur: Das letzte blaue Teilstück, wenn man es denn geschafft hat, alle anderen aufzudecken, kann man nicht freilegen. Es hat ja keinen blauen Nachbarn, mit dessen Hilfe man es umdrehen könnte. Na gut, wir erlauben, dass dieses letzte Bild direkt umgedreht wird.

Dieser Spielverlauf führt fast bis zum Ziel. Rot eingerahmt ist jeweils das Feld, dessen Nachbarn soeben umgedreht wurden.



FURKA-OBERALPBAHN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Disentis für Erwachsene

Um mir das lästige Gefummel mit den kleinen Schnipseln zu ersparen, verlegte ich das Spiel auf den Bildschirm eines Computers. Unter der Internet-Adresse http://cs.uni-muenster.de/disentis und mit einem Java-fähigen Browser können Sie es selbst ausprobieren. Beim Start trifft man auf 5×5 quadratische blaue Felder, die beim Anklicken mit der Maus ihre Nachbarfelder zwischen den beiden Zuständen »blau« und »Bild sichtbar« hin- und herschalten. Nur das Anklicken des letzten blauen Felds schaltet dieses selbst um. Die Größe des Spielfelds kann von 2×2 bis 12×12 variiert werden.

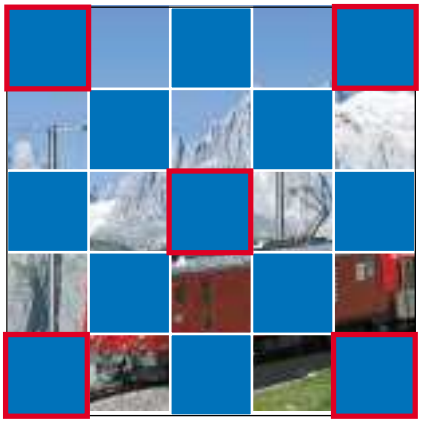
Bevor Sie sich an den Rechner setzen, ist eine Warnung angebracht: Nach Disentis gelangt man nicht in ein paar Minuten. Kaum hat man mit dem Spiel angefangen, verliert man sich in der Klickerei, wundert sich, wenn man nach einer halben Stunde noch immer nicht am Ziel ist, freut sich an den Mustern, die man herbeiklicken kann, oder daran, dass man alle Felder bis auf gerade mal zwei blaue aufgedeckt hat, und ärgert sich zugleich, weil der Weg von zwei blauen Feldern zu einem einzigen allem Anschein nach nicht kürzer ist als der von 25 zu einem. Nein, es ist keineswegs

einfach, nach Disentis zu kommen. (Es sei denn, man stellt eine Spielfeldgröße von 2 oder 3 ein. Dann geht alles wie von selbst.)

Im Bild auf Seite 110 unten kann man einen Spielverlauf sehen, der auf direktem Weg zu einer Situation mit nur noch zwei blauen Feldern führt. Probieren Sie, ob Sie von dieser Situation aus schneller ans Ziel gelangen als von der ursprünglichen!

Einige regelmäßige Konfigurationen sind tatsächlich leicht zu erreichen. Zum Beispiel erhält man mit nur fünf Klicks (in die Mitte und die vier Ecken) ein Schachbrettmuster (Bild unten).

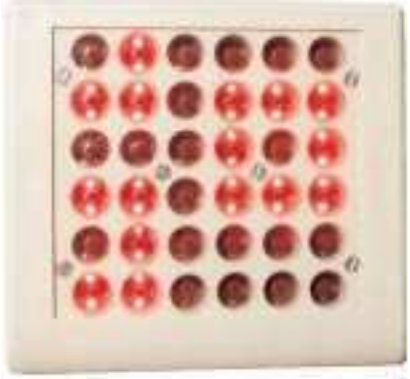
Mit dem umgekehrten Schachbrett, bei dem die Ecken aufgedeckt sind, tut man sich allerdings erheblich schwerer. Richtig frustrierend wird die Sache jedoch dann, wenn man nach langem Herumklicken plötzlich durch Zufall das letzte blaue Feld vor sich hat. Man klickt es an, das ganze Bild ist da, man ist sozusagen in Disentis angelangt – und hat den Weg vergessen. Noch immer hat man keine Ahnung, wie man nach Disentis kommt.



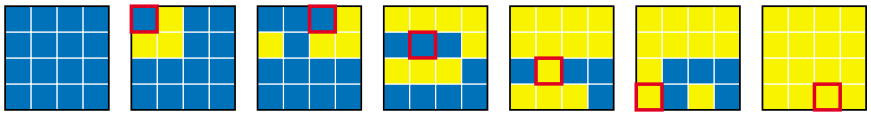
FURKA-OBERALPBAHN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Ein Schachbrettmuster ist sehr einfach herzustellen.

Ein »Gameboy« für das Spiel Trisentis



ACHIM CLAUSING



So löst man das Spiel Trisentis der Größe 4×4.

Wenn man sein Ziel nicht auf direktem Weg erreichen kann, hilft manchmal ein Umweg weiter – in unserem Fall über Trisentis. Auf der Landkarte der Schweiz sucht man vergebens nach diesem Namen; er steht für eine etwas trivialere Variante des Disentis-Spiels, bei der es erlaubt ist, jedes beliebige Feld anzuwählen und damit dessen Nachbarfelder zwischen den zwei Zuständen »verdeckt« und »sichtbar« hin- und herzuschalten. Damit hat man viel mehr Einflussmöglichkeiten als bei der ursprünglichen Version. Auch die gesonderte Behandlung, die wir dem letzten verdeckten Feld geben mussten, erübrigt sich.

Trisentis: der Umweg zum Ziel

Trisentis kann man ebenfalls auf der oben angegebenen Website ausprobieren. Zur Unterscheidung von Disentis werden aufgedeckte Karten als gelbe Quadrate (ohne Bild) dargestellt. Spielziel ist also, ein völlig gelbes Spielfeld herzustellen.

Für Trisentis der Größe 6×6 hat Ludger Sasse vom Institut für Physiologie der Universität Münster eine Art Gameboy gebaut (Bild links unten), den Kinder gerne und mit erstaunlicher Ausdauer benutzen. An die Stelle der Papierschnipsel treten Schalter mit eingebauter Leuchtdiode. Wenn ein Feld leuchtet, entspricht das dem Zustand »sichtbar«. Drücken auf einen Schalter ändert den Beleuchtungszustand (an oder aus) aller Nachbarfelder. Die Schaltung ist im Prinzip sehr einfach. Durch Ausblenden von Schaltern mit einer Maske kann man damit auch kleinere Spielfeldgrößen realisieren, beispielsweise 4×4 durch Zudecken der Randzeilen.

Das Trisentis-Spiel der Größe 4×4 ist wirklich kinderleicht zu lösen. Sechs Klicks genügen, um alle Felder gelb zu machen (Bild rechts oben). Und wie man durch Experimentieren sehr schnell feststellt, kommt es auf die Reihenfolge der Klicks überhaupt nicht an. Man kann unterwegs auch beliebige andere Felder anklicken und den Effekt später durch nochmaliges Anklicken wieder rückgängig machen. Für den Endzustand ist nur wichtig, ob die Anzahl der Klicks auf ein Feld ungerade oder gerade war.

Für das Spiel Disentis gilt im Prinzip dasselbe. Es kommt nicht darauf an, ob man drei Felder in der Reihenfolge *A*, *B*, *C* oder *C*, *B*, *A* anwählt – es sei denn, Feld *A* wäre durch die Aktion *B* bereits umgedreht worden und daher nicht mehr anwählbar. Aus diesem Grund ist Disentis schwieriger zu spielen als Trisentis.

Das Wesentliche eines Trisentis-Spielverlaufs wird offenbar durch ein Quadrat aus Nullen und Einsen beschrieben, bei der die Einsen die Felder angeben, die anzuklicken sind. Im vorangehenden Beispiel ist das

1	0	1	0
0	1	0	0
0	1	0	0
1	0	1	0

Die Mathematiker nennen eine solche Tabelle eine Matrix und umgeben sie mit Klammern, statt die einzelnen Felder einzufärben. Eine Matrix auf einen Zustand anzuwenden bedeutet genau die Felder anzuklicken, in denen eine Eins steht.

Die Matrix unseres Beispiels kann man an der Senkrechten oder an einer ihrer Diagonalen spiegeln, die Wirkung bleibt dieselbe. Was passiert, wenn man zunächst die Matrix und dann eine ihrer gespiegelten Varianten auf den Ausgangszustand anwendet? Dann werden alle Felder zweimal umgeklappt, und das Spiel ist wieder im Urzustand.

Statt die beiden Matrizen hintereinander anzuwenden, kann man sie auch addieren und die Matrix, die sich daraus ergibt, anwenden. Dabei ist die Addition elementweise zu verstehen: Das linke obere Element der einen Matrix plus das linke obere Element der zweiten Matrix ergibt das linke obere Element der Summenmatrix, und so weiter. Vor allem aber: 1+1=0, denn zweimal dasselbe Feld anzuklicken ist dasselbe wie nichts tun.

1	0	1	0
0	1	0	0
0	1	0	0
1	0	1	0

+

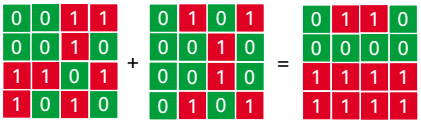
1	0	0	1
0	1	1	0
1	0	0	1
0	0	0	0

=

0	0	1	1
0	0	1	0
1	1	0	1
1	0	1	0

In der Tat lässt diese Matrix jeden Zustand, auf den sie angewendet wird, unverändert. Addiert man nun noch eine weitere der gespiegelten Matrizen dazu, dann wechseln wieder alle Felder ihre Farbe. Man be- ▷

▷ kommt eine neue, von der ersten wesentlich verschiedene Lösung:



Man kann das durch Anklicken der entsprechenden zehn Felder bestätigen, aber schon durch Hinschauen kann man sich davon überzeugen, dass in der letzten Matrix jedes der 16 Felder eine ungerade Anzahl von Einsen als Nachbarn hat. Und das ist genau die Eigenschaft, die eine solche Matrix zu einer Lösung von Trisentis macht.

Wer zwei Semester Mathematik studiert hat, nickt an dieser Stelle und stellt fest, dass hinter dem Ganzen offenbar ein Stück Lineare Algebra über dem Körper F_2 steckt. Lineare Algebra ist – unter anderem – die Wissenschaft von der Auflösung linearer Gleichungssysteme mit beliebig vielen Unbekannten; erste Anfänge davon pflegt man in der Schule unter den Namen »Einsetzungsverfahren« und »Additionsverfahren« kennen zu lernen. Hier rechnen wir allerdings nicht mit den gewöhnlichen (reellen) Zahlen, sondern mit einem Zahlensystem, das nur aus 0 und 1 besteht. Die Rechenregel 1+1=0 ist etwas gewöhnungsbedürftig; aber die Gesetze der Addition und der Multiplikation gelten »wie zu Hause«, und alle Rechenoperationen – mit der üblichen Ausnahme der Division durch null – sind durchführbar. Die Sätze aus der Linearen Algebra hängen nicht an den Eigenschaften der reellen Zahlen, sondern nur an diesen formalen Rechengesetzen; deswegen sind sie unverändert auf unser Spiel anwendbar.

Wie man nach Trisentis kommt

Für Trisentis der Größe $n \times n$ sind n^2 lineare Gleichungen mit ebenso vielen Unbekannten zu lösen. Mit Computerunterstützung ist diese Berechnung für nicht allzu große n kein Problem. Unsere Klick-Matrix ist übrigens nicht die Matrix dieses Gleichungssystems! Vielmehr ist sie als der – zunächst unbekannte – Vektor der Länge n^2 aufzufassen, der das Gleichungssystem löst.

Für ein Urlaubsspiel ist dieser Zugang aber eigentlich nicht das Wahre. Glücklicherweise gibt es auch einen Weg, der ganz ohne Rechnen zum Ziel führt und zudem unterwegs manchen Ausblick bietet, den man bei der Reise mit dem Hochgeschwindigkeitszug Computer gar nicht wahrnehmen würde.

Man kann aus jeder Konfiguration heraus jede andere ansteuern, wenn man den folgenden Zeilenalgorithmus kennt.

Um die Felder einer Zeile in einen gewünschten Zustand zu bringen (zum Beispiel alle gelb), besucht man von links nach rechts alle Felder der darunter liegenden Zeile, beginnend mit dem zweiten Feld. Immer dann, wenn das schräg links über dem gerade besuchten Feld liegende Feld die falsche Farbe hat, klickt man und gibt ihm so die richtige Farbe.

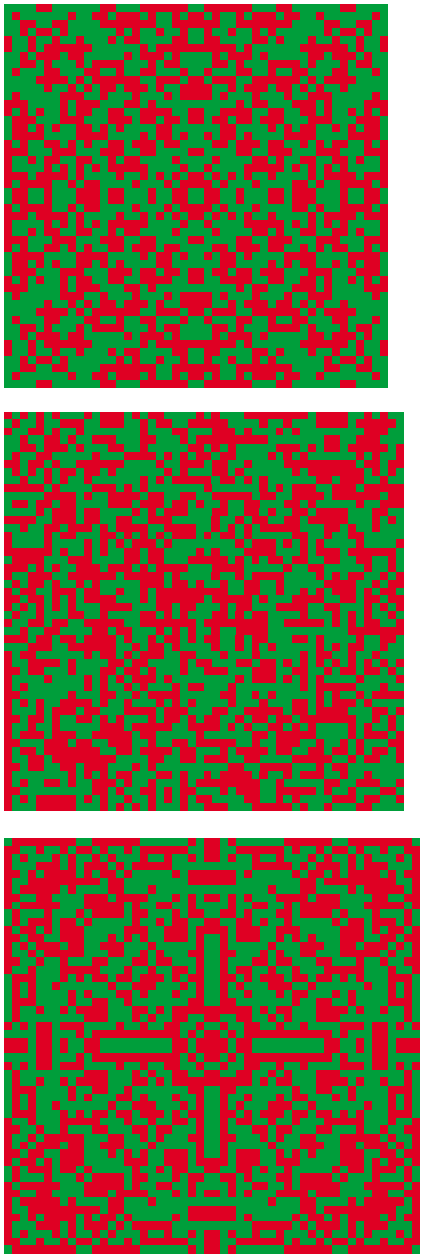
Auf diese Weise kann man die Felder einer Zeile mit Ausnahme des letzten Felds in den gewünschten Zustand bringen. Weil man von schräg unten klickt und nach rechts fortfährt, machen die weiteren Eingaben nichts mehr kaputt. Wenn das letzte Feld der oberen Zeile nun auch die richtige Farbe hat, ist diese Zeile »fertig«. Andernfalls klickt man das erste Feld der unteren Zeile an, das man noch nicht berührt hatte, und durchläuft die Zeile ein zweites Mal, wobei man wieder die schräg links darüber liegenden Farben nach Bedarf korrigiert.

Nur die unterste Zeile des Spielfelds kann man auf diese Weise nicht aufräumen – zu ihr gibt es keine darunter liegende Zeile. Außerdem funktioniert das Verfahren nur dann mit Sicherheit, wenn die Zeilenlänge n bei Teilung durch 3 den Rest 0 oder 1 hat. Wenn n den Rest 2 hat, kann es vorkommen, dass auch nach dem zweiten Durchgang die darüber liegende Zeile im letzten Feld wieder die falsche Farbe hat. (Das liegt daran, dass jedes innere Feld der unteren Zeile zu drei Feldern der oberen Zeile benachbart ist, während die beiden Randfelder nur zwei Nachbarn in der oberen Zeile haben.)

Am besten übt man das Verfahren mit einem 6×6-Spielfeld. Nach kurzer Zeit beherrscht man die Regel und kann dann auch ein völlig durcheinander gebrachtes Spiel in jede gewünschte Konfiguration (blau, gelb, Schachbrett, …) bringen – mit Ausnahme der letzten Zeile.

Wie kann man die auch noch in Ordnung bringen? Durch Klicken in die bisher ungenutzte oberste Zeile des Spielfelds. Aber welche Felder genau sind anzuwählen? Das findet man durch gezieltes Probieren heraus. Von einem einheitlich blauen Spielfeld ausgehend klickt man in der ersten Zeile ein einzelnes Feld an und färbt dann mit dem Zeilenalgorithmus das ganze Spielfeld blau, bis in der letzten Zeile gelbe Felder übrig bleiben. Beim 6×6-Trisentis ergibt die Eingabe 1 0 0 0 0 0 in Zeile 1 (also das Anklicken von Feld 1) den Zustand 0 1 1 1 0 0 in der sechsten Zeile, weil die Felder 2, 3 und 4 gelb bleiben. Auf dieselbe Weise findet man die Wirkung einer Eins an anderen Stellen der ersten Zeile:

Lösungen von Trisentis für $n = 48$, 50 und 52. Die roten Quadrate sind anzuklicken. Jedes einzelne Quadrat, ob rot oder grün, hat eine ungerade Anzahl von roten Nachbarn. Die Lösungen für $n = 48$ und $n = 52$ sind die einzig möglichen. Für $n = 50$ gibt es $2^{16} = 65536$ verschiedene Lösungen.



Eingabe in die erste Zeile

1	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0
0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	1

Resultat in der sechsten Zeile

0	1	1	1	0	0
1	1	0	1	1	0
1	0	1	0	1	1
1	1	0	1	0	1
0	1	1	0	1	1
0	0	1	1	1	0

Jetzt kann man kombinieren: Die Eingabe 1 0 0 0 0 0 + 0 1 0 0 0 0 + 0 0 1 0 0 0 = 1 1 1 0 0 0 ergibt, wenn man alle Felder der Zeilen 1 bis 5 blau macht, die sechste Zeile 0 1 1 1 0 0 + 1 1 0 1 1 0 + 1 0 1 0 1 1 = 0 0 0 0 0 1. (Natürlich wird dabei wieder mit 1+1=0 gerechnet.)

Aha! Man kann den Zustand eines einzelnen Felds der letzten Reihe ändern. Das gilt für alle Felder der letzten Zeile, wie man durch Probieren herausfindet. Die folgende Tabelle zeigt, wie jedes Feld der letzten Zeile einzeln zu beeinflussen ist:

Eingabe in die erste Zeile

0	0	0	1	1	1
0	0	1	1	0	1
0	1	1	0	1	1
1	1	0	1	1	0
1	0	1	1	0	0
1	1	1	0	0	0

Resultat in der sechsten Zeile

1	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0
0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	1

Damit wissen wir, wie man »nach Trisentis kommt«: Ein erster Durchgang mit dem Zeilenalgorithmus dreht alle Felder auf die gelbe Seite bis auf möglicherweise einige Felder in der untersten Reihe. Man sieht nach, welche das sind, addiert die zugehörigen Eingaben für die erste Zeile, klickt diese Felder an und macht einen zweiten Durchgang mit dem Zeilenalgorithmus. Und da passiert das Wunder: Das Spiel geht auf, auch die letzte Zeile wird gelb.

Nicht für alle n kann man das Spiel auf diese Weise lösen. So gibt es für alle ungeraden n Konfigurationen des Spielfelds, die nicht erreichbar sind, darunter das gelbe Spielfeld – Trisentis ist nur für gerade n lösbar! Auch bei geradem n kann man nicht immer alle Konfigurationen herbeiklicken, mindestens bis n = 150 ist aber für gerades n »gelb« immer möglich.

Für manche Werte von n gibt es genau eine Lösung, die dann in der Regel eine schöne Symmetrie besitzt, für andere dagegen sehr viele, meist weniger schöne. Im Bild Seite 112 sieht man drei Beispiele für dieses Verhalten.

Das Spiel Trisentis gibt Anlass zu mancherlei Entdeckungen – weit mehr als nur die, die hier erwähnt wurden. Aber wie kommt man denn nun von Trisentis nach Disentis, sprich zur Lösung des ursprünglichen Problems? Einen markierten Weg, also eine Vorschrift wie den Zeilenalgorithmus für Trisentis, gibt es zwar bisher nicht. Das Ziel liegt aber in greifbarer Nähe, und man kommt ganz gut querfeldein – ohne einen algorithmischen Weg – durch.

Was ist zu tun? Man löse zunächst das Trisentis-Spiel der entsprechenden Größe, und zwar so, dass ein einzelnes blaues Quadrat übrigbleibt (das Feld, das sich beim letzten Klick selbst umdreht). Die Eingaben für diese Lösung versucht man dann in eine solche Reihenfolge zu bringen, dass jeder Klick in ein blaues Feld erfolgt. Man darf zusätzlich Klicks in Felder machen, die nicht in der Trisentis-Lösung auftauchen, muss diese aber später rückgängig machen. Genauer gesagt: Andere Felder müssen eine gerade Anzahl von Malen angeklickt werden – am besten null Mal.

Für die Reihenfolge der anzuklickenden Felder kommt man mit der einfachsten denkbaren Lösung schon relativ weit: Man gehe zeilenweise vor. Ist eines der Eingabefelder nicht blau, überspringt man es und holt die verpasste Eingabe nach, sobald es durch andere Eingaben blau wird. Wenn kein Eingabefeld mehr blau ist, klicke man ein Hilfsfeld an – am besten ein benachbartes, sodass das eigentlich zu klickende Feld blau wird – und widerrufe diesen Klick später durch einen Klick auf dasselbe Feld. So findet man zum Beispiel die im Bild unten angegebene Lösung.

Aber die Furka-Oberalp-Bahn hält doch in der Ortsmitte von Disentis! Wäre es nicht schön, wenn wir dort aussteigen könnten? Für uns bedeutet das, eine Folge von Eingaben zu konstruieren, bei der das mittlere Quadrat des Spielfelds als letztes übrigbleibt. Das geht tatsächlich, sogar in weniger als zwanzig Schritten. Finden Sie den Weg? Die Lösung finden Sie auf unserer Website www.spektrum.de. ◁

Achim Clausing ist Professor für Informatik an der Universität Münster (Westfalen).

Literaturhinweise

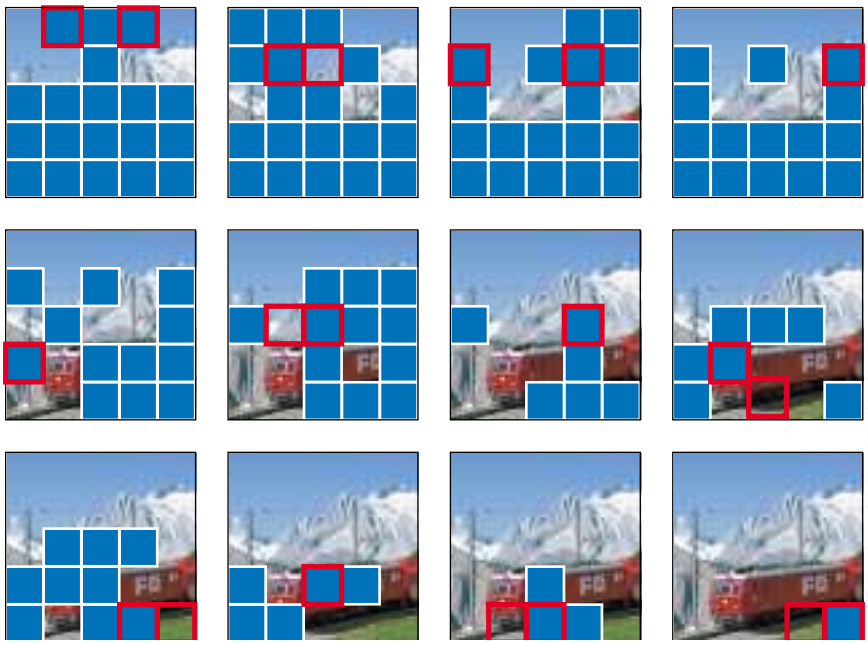
Das Trisentis-Spiel. Von Achim Clausing in: Mathematische Semesterberichte, Bd. 48, Nr. 1, S. 29 (2001).

Un jeu à épisodes pour l'été. Von Jean-Paul Delahaye in: Pour la Science, August 2002, S. 98.

Weblinks zum Thema und die Lösung für den Weg in die Mitte von Disentis finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

0	1	0	1	0
1	1	1	1	1
0	1	1	1	0
1	1	1	0	0
0	1	0	0	0

Der Weg nach Disentis in zwanzig Schritten. Man ermittelt zuerst eine Trisentis-Lösung, die ein einziges blaues Feld in der rechten unteren Ecke liefert (oben), und findet dann eine geeignete Reihenfolge für das Klicken. Die rechten drei Felder in der untersten Zeile müssen unterwegs zweimal angeklickt werden.



FURKA-OBERALPBAHN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Lexikon der Chemie

Umfassend, zuverlässig und aktuell informiert das 3-bändige *Lexikon der Chemie* über die Grundlagen der Chemie und vermittelt fundierte Hintergrundinformationen über moderne Anwendungen in der Praxis von Industrie und Forschung. Zahlreiche Illustrationen, eine einheitliche Nomenklatur nach IUPAC-Empfehlung und eine ausgereifte Verweissystematik erlauben dem Benutzer die schnelle, präzise und gut verständliche Information.

- drei Alphabetbände mit jeweils ca. 485 S., geb.
- rund 10.000 Stichwörter zu allen Gebieten der Chemie, darunter auch zu hochaktuellen Bereichen wie Umweltchemie, Biochemie und Biotechnologie
- verfasst von 40 namhaften Autoren
- über 400 Abb. und Tab. sowie 1.120 Strukturformeln

Unsere Angebote

Gesamtausgabe Buch
zum Preis von insgesamt € 99,95. Sie sparen € 74,05 gegenüber der früheren Originalausgabe! *ISBN 3-8274-0552-1*

Gesamtausgabe CD-ROM
zum Preis von insgesamt € 99,95. Sie sparen € 74,05 gegenüber der früheren Originalausgabe! *ISBN 3-8274-1152-1*

Kombi-Ausgabe: Buch + CD-ROM
zum Preis von insgesamt € 149,–. Sie sparen € 112,– gegenüber der früheren Originalausgabe! *ISBN 3-8274-1151-3*

! Bestellen können Sie mit der Bestellkarte vorne im Heft. Oder: per Tel. 07071-935369, per Fax: 06221/9126338 oder per Mail: shop@spektrum-verlag.de

Spektrum Akademischer Verlag

www.spektrum-verlag.de

Hinweis für Stellenmarktkunden

Formate:

1/1 Seite (184 mm x 244 mm)	Preise für
1/2 Seite hoch (91 mm x 244 mm)	Anzeigen
1/2 Seite quer (184 mm x 121 mm)	auf Anfrage
1/3 Seite quer (76 mm x 184 mm)	
1/4 Seite (91 mm x 121 mm)	

Für weitere Informationen zum Stellenmarkt kontaktieren Sie bitte:

Fränk Beermann
VDI-Nachrichten
Telefon (02 11) 61 88-229
Telefax (02 11) 61 88-147

Weitere Infos unter
stellenanzeigen@vdi-nachrichten.com

Auf dünnem Eis?

Droht der Eisschild der Westantarktis kurzfristig abzuschmelzen – wodurch der Meeresspiegel um fünf Meter anstiege? Genaue Untersuchungen geben nun vorsichtige Entwarnung.

WEITERE THEMEN IM FEBRUAR

Verwaiste Planeten

Nicht nur die Sonne, auch fremde Sterne werden von Planeten umkreist. Aber manche dieser Himmelskörper treiben ohne Zentralgestirn durch das All.

Archäologie: Als die Gallier Römer wurden

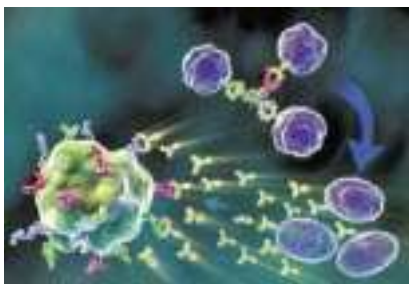
Mit brutaler Gewalt ließ Cäsar Gallien erobern, mit Geschick romanisierten die neuen Machthaber die Kelten, bis nichts mehr an deren eigene Kultur erinnerte.

Strings und Membranen – Urbausteine der Welt?

Eine umfassende »Theory of Everything« führt die gesamte Physik auf winzige Fäden und Membranen zurück. Neue Teilchenbeschleuniger könnten bald erste Beweise liefern.

Korallengärten im tiefen Nordatlantik

Meeresbiologen erkennen immer klarer die Bedeutung der Korallenriffe in den Tiefen der Ozeane etwa für den Fischnachwuchs. Doch entlang der Kontinentalränder und Schelfmeere hat der Mensch weite Abschnitte bereits zerstört.



Süße Medizin

Zuckerverbindungen, lange ein Stiefkind biomedizinischer Forschung, bieten einen Schlüssel zu neuartigen Medikamenten gegen Infektionen, Erbkrankheiten oder Krebs.